

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Інститут Електроенергетики
(інститут)

Електротехнічний факультет
(факультет)

Кафедра електропривода
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеню магістра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студента Броницького Є.І.
(ПІБ)

академічної групи 141М-17-4
(шифр)

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)

спеціалізації _____

за освітньо-професійною програмою Електромеханічні системи автоматизації та електропривод

(офіційна назва)

на тему Дослідження роботи частотно-керованого електропривода вентиляторів, що включені паралельно на спільну мережу

(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
Кваліфікаційної роботи розділів:	Бешта О.С.			
Завдання на розробку	Бешта О.С.			
Розрахункова частина	Бешта О.С.			
Проведення досліджень	Бешта О.С.			
Техніко-економічне обґрунтування	Тимошенко Л.В.			
Рецензент				
Нормоконтролер	Казачковський М.М.			

Дніпро
2018

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри
електропривода
(повна назва)

_____ Казачковський М.М.
(підпис) (прізвище, ініціали)

« _____ » _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
ступеня магістра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студенту Броницький Є.І. академічної групи 141М-17-4
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

спеціалізації¹ _____

за освітньо-професійною програмою Електромеханічні системи автоматизації та електропривод
(офіційна назва)

на тему Дослідження роботи частотно-керованого електропривода вентиляторів, що включені паралельно на спільну мережу _____,

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від _____ № _____

Розділ	Зміст	Термін виконання
Завдання на розробку	Визначення напрямків досліджень	01.10.2018- 05.10.2018
Технологічна частина	Особливості роботи вентиляторних установок при частотному електроприводі	06.10.2018- 01.11.2018
Частотно-регульований електропривод вентиляторів	Розробка системи частотного керування, розрахунок параметрів двигуна, побудова механічних характеристик	02.11.2018- 20.12.2018
Дослідження режимів роботи частотно-керованого електропривода	Розробка математичної моделі вентилятора, математичної моделі електропривода, проведення досліджень.	21.11.2018- 05.12.2018
Техніко-економічне обґрунтування	Визначення капітальних та експлуатаційних витрат при впровадженні електроприводу з векторним керуванням.	06.12.2018- 15.12.2018

Завдання видано _____

(підпис керівника)

Бешта О.С.

(прізвище, ініціали)

Дата видачі 1 жовтня 2018

Дата подання до екзаменаційної комісії _____

Прийнято до виконання _____

(підпис студента)

Броницький Є.І.

(прізвище, ініціали)

Реферат

Пояснювальна записка: 59 с., 16 табл., 24 рис., 18 джерел.

Об'єкт розробки: вентиляторна установка з паралельними вентиляторами та частотно-керованим електроприводом.

Мета дипломного проекту: дослідити роботу частотно-регульованих електроприводів вентиляторів при їх паралельній роботі.

У вступі зазначена необхідність дослідження режимів роботи паралельно працюючих вентиляторів та їх електроприводів.

У першій частині розглянуто роботу вентиляторної установки при частотному керуванні. Описані особливості паралельної роботи вентиляторів. .

В розділі 2 розглянуто систему частотно-керованого електропривода, виконано розрахунок параметрів двигуна, розрахунок механічних характеристик.

У розділі 3 розроблено математичну модель електропривода , математичну модель вентилятора, проведено моделювання роботи системи та аналіз отриманих результатів.

В розділі “Техніко-економічне обґрунтування ”розраховані капітальні та експлуатаційні витрати на впровадження запропонованої системи частотно-керованого електропривода.

ВЕНТИЛЯТОР, ПАРАЛЕЛЬНА РОБОТА, АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ЧАСТОТНЕ КЕРУВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ.

Abstract

Explanatory note: 59 pages, 16 tables, 24 figures, 18 sources.

Development object: fan unit with parallel fans and frequency controlled electric drive.

The purpose of the diploma project: to investigate the work of frequency controlled electric drives fans during their parallel work.

The introduction indicates the need to study the operating modes of parallel operating fans and their electric drives.

In the first part the work of the fan unit at frequency control is considered. Features of parallel work of fans are described. .

In section 2 the system of frequency controlled electric drive is considered, the calculation of engine parameters, calculation of mechanical characteristics.

In Section 3 a mathematical model of the electric drive, a mathematical model of the fan was developed, a system modeling was carried out and an analysis of the obtained results was carried out.

In the section "Feasibility study" capital and operating costs for the implementation of the proposed frequency controlled electric drive system are calculated.

FAN, PARALLEL WORK, ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE,
FREQUENCY CONTROL, MODELING.

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	7
1.1 Вентиляторна установка з частотно-керованим електроприводом	7
1.2 Особливості паралельної роботи вентиляторів	9
1.3 Відцентровий вентилятор серії ВРАН9.....	12
2 ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ВЕНТИЛЯТОРІВ	20
2.1 Розробка математичної моделі двигуна.....	21
2.2 Механічні характеристики асинхронного двигуна при вольт-частотному керуванні	29
3 ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ВЕНТИЛЯТОРІВ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНІЙ РОБОТІ ...	34
3.1 Розробка математичної моделі	34
3.2 Математична модель вентилятора та мережі.....	37
3.3 Моделювання роботи електропривода та аналіз результатів.....	43
4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	45
4.1 Розрахунок капітальних витрат	45
4.2 Розрахунок експлуатаційних витрат.....	48
4.2.1 Розрахунок амортизаційних відрахувань	48
4.2.2 Розрахунок вартості спожитої електроенергії.....	49
4.2.3 Витрати на технічне обслуговування и поточний ремонт	51
4.3 Оцінка економічної ефективності проекту.....	52
ВИСНОВКИ.....	54
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	55
Додаток 1	57
Додаток 2	58

ВСТУП

Вентиляторні установки відцентрового типу є найбільш розповсюдженими вентиляторними установками. Вони використовуються у різних галузях виробництва як легкої, так і важкої промисловості. Частіш за все, відцентрові вентилятори встановлюються як установки з нерегульованим електроприводом, особливо малої потужності. Але є багато технологічного устаткування, особливо у виробничій сфері, де необхідно регулювати продуктивність вентиляторів. Причому регулювання здійснюється у доволі широких межах. Також є важливі процеси де обов'язково необхідно створювати аварійний резерв. Підбір типу вентиляторної установки, яка забезпечить енергоефективне регулювання продуктивності вентиляторів, знизить величину мінімально необхідного резерву є важливою та відповідальною задачею.

Електропривод відцентрових вентиляторів звичайно реалізовано на базі асинхронного короткозамкненого двигуна. Для регулювання подачі такого вентилятора здійснюється регулювання швидкості обертання двигуна за допомогою перетворювача частоти. Причому створено окремий клас перетворювачів спеціально для турбомеханізмів: вентиляторів, компресорів та насосів. В перетворювачі вбудовані свої окремі функції, що враховують особливості роботи саме цих механізмів.

Доволі часто для підвищення технологічних характеристик вентиляторів (подачі) здійснюють їх паралельне підключення до спільної мережі. При паралельній роботі вентиляторів виникають нестандартні режими роботи вентиляторів оскільки вони впливають один на одного. Ще більше особливостей з'являється при регулюванні швидкостей вентиляторів. Знання всіх цих особливостей дозволяє здійснювати ефективне регулювання вентиляторних установок, складених з декількох вентиляторів. Саме дослідженню режимів роботи регульованого електропривода вентиляторів, що включені паралельно і присвячена ця робота.

1. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1 Вентиляторна установка з частотно-керованим електроприводом

Серед відомих способів регулювання продуктивності вентиляторних установок, а саме дроселювання, зміна кута встановлення лопатей, використання направляючих апаратів, регулювання числа обертів валу вентилятора є самим ефективним способом [1- 3]. В сучасних умовах зміна обертів валу вентилятора здійснюється зміною обертів валу привідного двигуна. Як правило, для приводу вентилятора використовуються електричні двигуна змінного струму. В основному це асинхронні короткозамкнені двигуни, а при великих потужностях та розмірах вентиляторів – синхронні. Найбільш ефективно регулювання швидкості обертання валу двигунів змінного струму здійснюється за рахунок використання перетворювачів частоти.

Розглянемо принцип регулювання продуктивності вентиляторної установки зміною її швидкості обертання. Для початку зазначимо, що будь-яка вентиляторна установка характеризується $H-Q$ характеристикою, де Q - продуктивність вентилятора (або витрата, подача), а H – тиск. Характеристики частіше за все надають у графічному вигляді, який відображає функціональну залежність виду $H=f(Q)$. Також додатково додають залежності $\eta=f(Q)$ та $N=f(Q)$, де η - коефіцієнт корисної дії (ккд) вентилятора, а P - його потужність. Приклад $H=f(Q)$ характеристик наведено на рис. 1.1. Лінія $M=RQ^2$ визначає характеристику магістралі на яку працює вентилятор.

При зміні частоти обертання вентилятора з n_1 до n_2 його характеристики (подача Q , напір H , потужність P) змінюються по законом подібності [1, 2]:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3, \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2, \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right).$$

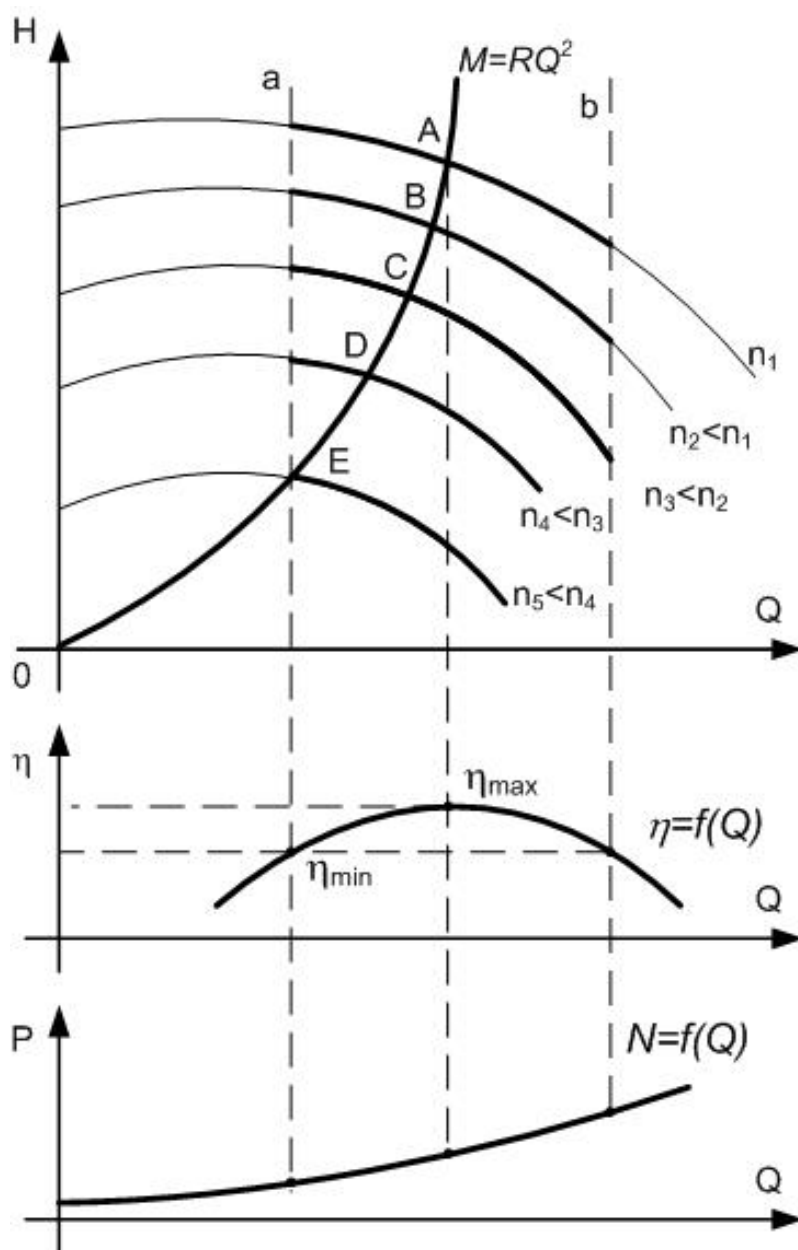


Рисунок 1.1 - H - Q характеристики вентилятора

Вентилятор та зовнішня мережа утворюють єдину систему, рівноважний стан якої визначається матеріальним та енергетичним балансом. Матеріальний баланс визначається умовою рівності подачі вентилятора витраті у зовнішній мережі, енергетичний - рівновагою напору вентилятора та напору, споживаному мережею. Графічно умова балансу системи визначається точкою перетину характеристик вентилятора та мережі (рис. 1.1). При даних характеристиках вентилятора та мережі є тільки одна точка, що відповідає умовам стійкої рівноваги (точки А, В, С, D,Е на графіку).

Лінії a та b на графіку обмежують робочу зону в який ккд вентилятора не знижується нижче $0,9 \times \eta_{\max}$. Саме такий рівень рекомендовано відповідними нормативами [4].

Також з графіків можна побачити, що із зменшенням частоти обертання зменшується споживана вентилятором потужність. Тому такий спосіб регулювання продуктивності вентилятора є найбільш енергоефективним. Як показує практика використання частотно-регульованого електроприводу вентиляторів, робочій діапазон частот обертання вентилятора пропорційній частоті 20-50 Гц живлячої двигун напруги.

1.2 Особливості паралельної роботи вентиляторів

Паралельна робота вентиляторів використовується в тих умовах, де є змінна витрата. Це пов'язано з деякими особливостями роботи вентиляторів. По-перше, встановлена вентиляторна установка повинна забезпечувати максимально необхідну витрату. По-друге, максимальний робочий коефіцієнт корисної η_{\max} дії різних типів вентиляторів знаходиться у межах від 0,45 до 0,85, в залежності від типу вентилятора, і як зазначалось вище, рекомендований діапазон роботи лежить у межах $0,9 \times \eta_{\max}$. Із зменшенням витрати вентилятора сильно зменшується його ккд, тому енергетичні втрати збільшуються. У третій, для важливих використань потрібне 100% резервування обладнання. Таким чином, при нерівномірному графіку витрати встановлення одного робочого агрегату може бути невигідним в наслідок підвищених капітальних витрат та втрат енергії при експлуатації.

Встановлення двох однакових вентиляторів меншої продуктивності значно покращує ситуацію і дозволяє підвищити енергетичну ефективність експлуатації установки і зменшити величину аварійного резерву до 50%. При цьому можемо отримати ширший діапазон регулювання витрат. Але капітальні витрати при цьому можуть бути дещо більшими, до 40%.

Розглянемо особливості паралельної роботи двох вентиляторів з однаковими характеристиками на одну спільну мережу (рис. 1.2).

Нехай є два вентилятори з однаковими $H-Q$ характеристиками, крива A та B на рис. 1.2, які представлені сукупністю точок a, b, c, d, e . Точка c є точкою з номінальними показниками H_H та Q_H . Для того щоб побудувати спільну сумарну $H-Q$ характеристику при паралельній роботі необхідно скласти абсиси точок характеристик при незмінних ординатах, тобто класти значення подач Q при незмінних значеннях тиску H [1]. Нова отримана характеристика матиме вигляд кривої $A+B$ (точки a_s, b_s, c_s, d_s, e_s).

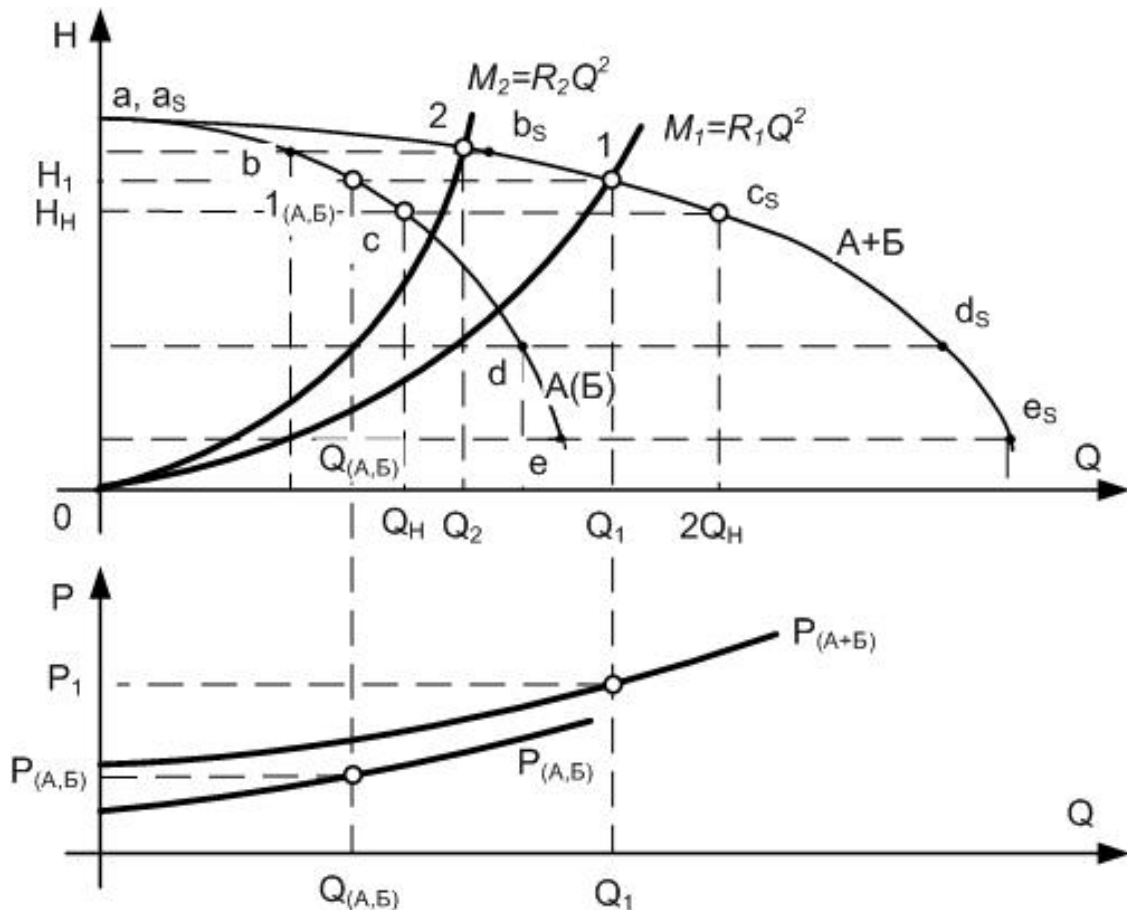


Рисунок 1.2 - Паралельна робота вентиляторів

Також на рис. представлені дві характеристики мережі $M_1 = R_1 Q^2$ та $M_2 = R_2 Q^2$, які відрізняються різними значеннями коефіцієнтів опору мережі R_1

та R_2 . Характеристика M_2 має більший опір мережі, тому є більш круто зростаючою.

Очевидним є той факт, що робочою точкою загальної $H-Q$ характеристики вентиляторів $A+B$ та мережі буде точка перетину характеристик (точки 1 та 2 на рис. 1.2). Наприклад, при роботі в m . 1 вентилятори працюють з сумарною витратою Q_1 та загальним надлишковим тиском H_1 . Як можна побачити, значення сумарної витрати в робочій точці буде менше ніж подвійна номінальна витрата $Q_1 < 2Q_H$. В робочій точці 2 значення витрати ще менше ніж в m . 2, $Q_2 < Q_1 < 2Q_H$.

Таким чином можна зробити висновок, що при паралельній роботі вентиляторів не завжди відбувається подвоєння продуктивності і суттєве підвищення продуктивності установки можливе тільки при малому опорі загального трубопроводу.

Звернемо увагу на залежність потужності від витрати $P = f(Q)$. На графіку потужностей представлені дві лінії – потужність окремого вентилятора $P_{(A,B)}$ та сумарна потужність паралельно працюючих вентиляторів $P_{(A+B)}$. В робочій m . 1 вентилятори споживають загальну потужність на рівні P_1 , при цьому кожний відповідно $P_{(A,B)}$ при відповідних витратах Q_1 та $Q_{(A,B)}$. Потужності вентиляторів однакові.

Припустимо, що характеристики вентиляторів стали відрізнятись, наприклад, швидкість вентилятора B зменшилась і його характеристика стала проходити нижче (рис. 1.3). При цьому відразу змінюється і сумарна характеристика (крива $(A+B)_3$). Загальна робоча точка з m . 1 перейде у m . 3 з дещо меншою витратою Q_3 . Оскільки характеристики вентиляторів різні вони починають працювати з різними витратами, відповідно Q_A та Q_B . Також відбувається перерозподіл потужностей. Потужність вентилятора B зменшується до рівня P_B , а вентилятора A збільшується до рівня P_A , навіть при незмінній характеристиці.

З вище наведеного можна зробити наступний висновок. *Для рівномірного завантаження вентиляторів при регулюванні їх загальної продуктивності необхідно одночасно змінювати характеристики обох вентиляторів.*

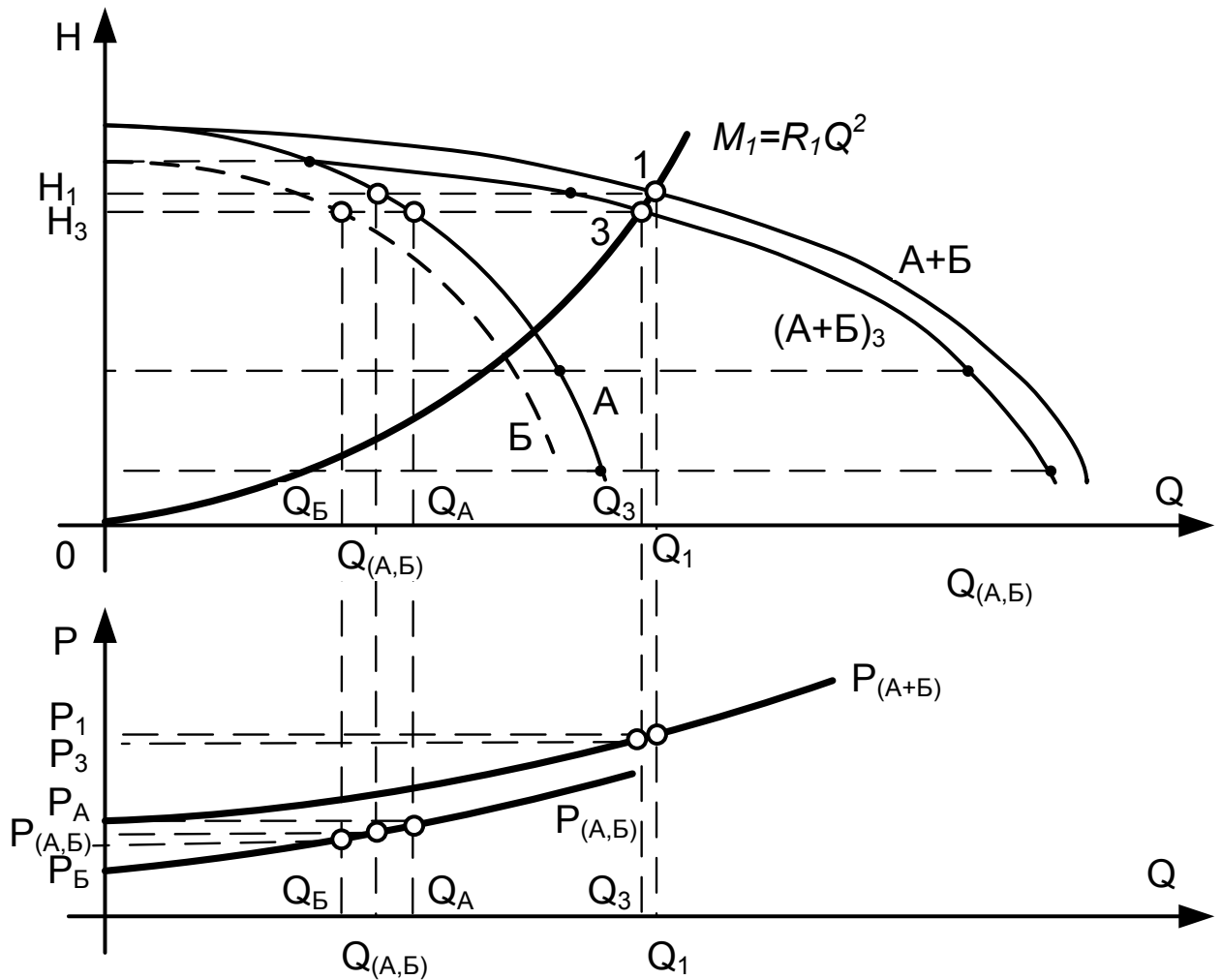


Рисунок 1.3 - Паралельна робота вентиляторів при відмінних характеристиках

1.3 Відцентровий вентилятор серії ВРАН9

Для дослідження паралельної роботи відцентрових вентиляторів використаємо відцентровий вентилятор типу ВРАН9-6,3 [5]. Технічні характеристики вентилятора наведені в табл. 1.1. Аеродинамічні характеристики вентилятора представлені на рис. 1.4.

Таблиця 1.1	
Технічні дані відцентрового вентилятора ВРАН9-6,3	
Тип вентилятора	ВРАН9-6,3
Номінальна робоча подача, м ³ /год (крива №6)	10 000
Номінальний тиск, Па	1500
Тип приводного двигуна	4А132S4У3 (або аналог)
Потужність приводного двигуна, кВт	7,5
Номінальна швидкість обертання, об/хв	1460
Момент інерції робочого колеса, кгм ²	1,078
Номінальний ккд	0,81

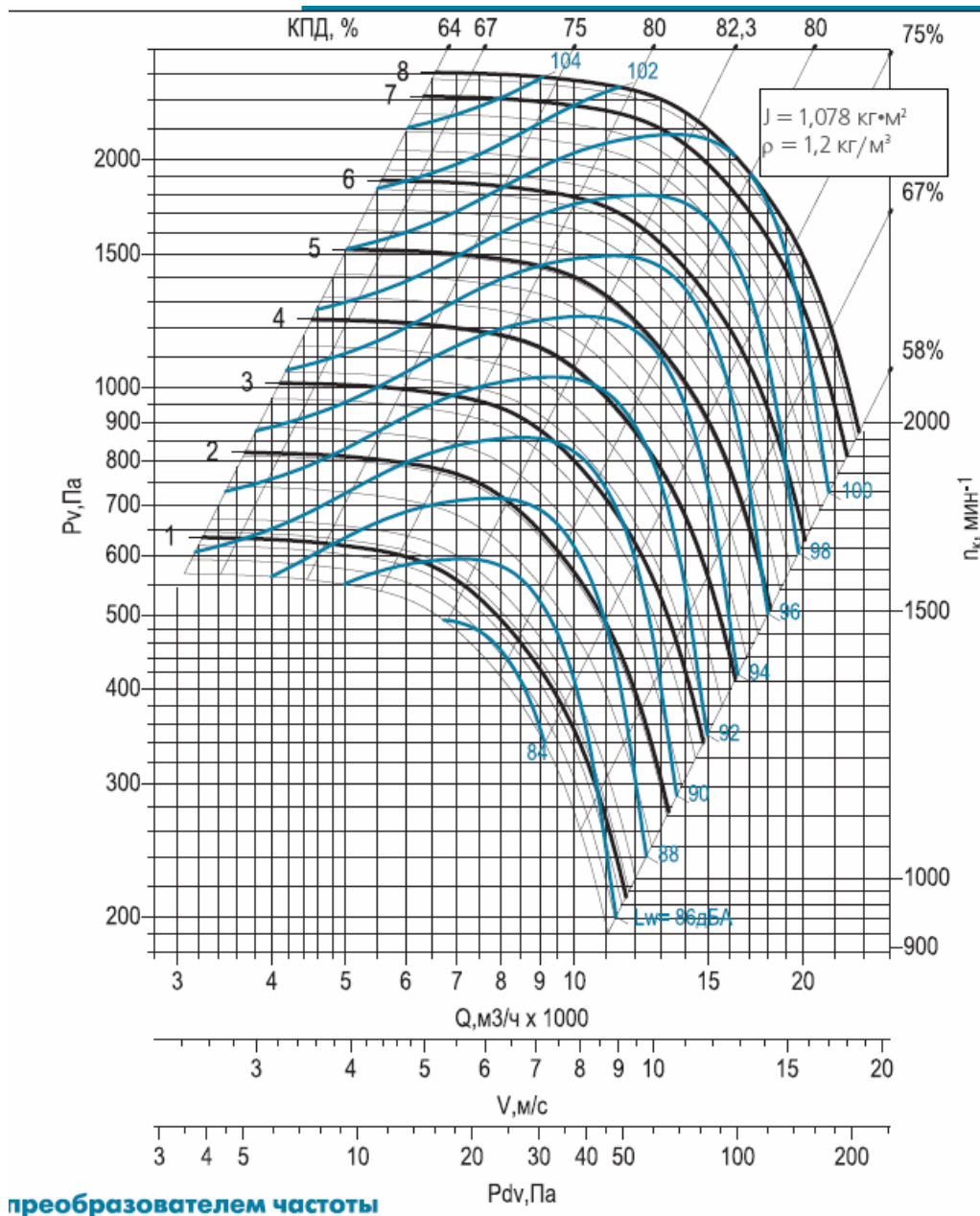


Рисунок 1.4 - Аеродинамічні характеристики відцентрового вентилятора ВРАН9-6,3. Масштаб логарифмічний.

Наведені аеродинамічні характеристики надані у логарифмічному масштабі. Для зручності подальших розрахунків побудуємо характеристику вентилятора у звичайному масштабі.

На рис. 1.5 представлені Н-Q- характеристики вентилятора при регулюванні його продуктивності зміною частоти обертання. Результати розрахунків зведені до табл. 1.2.

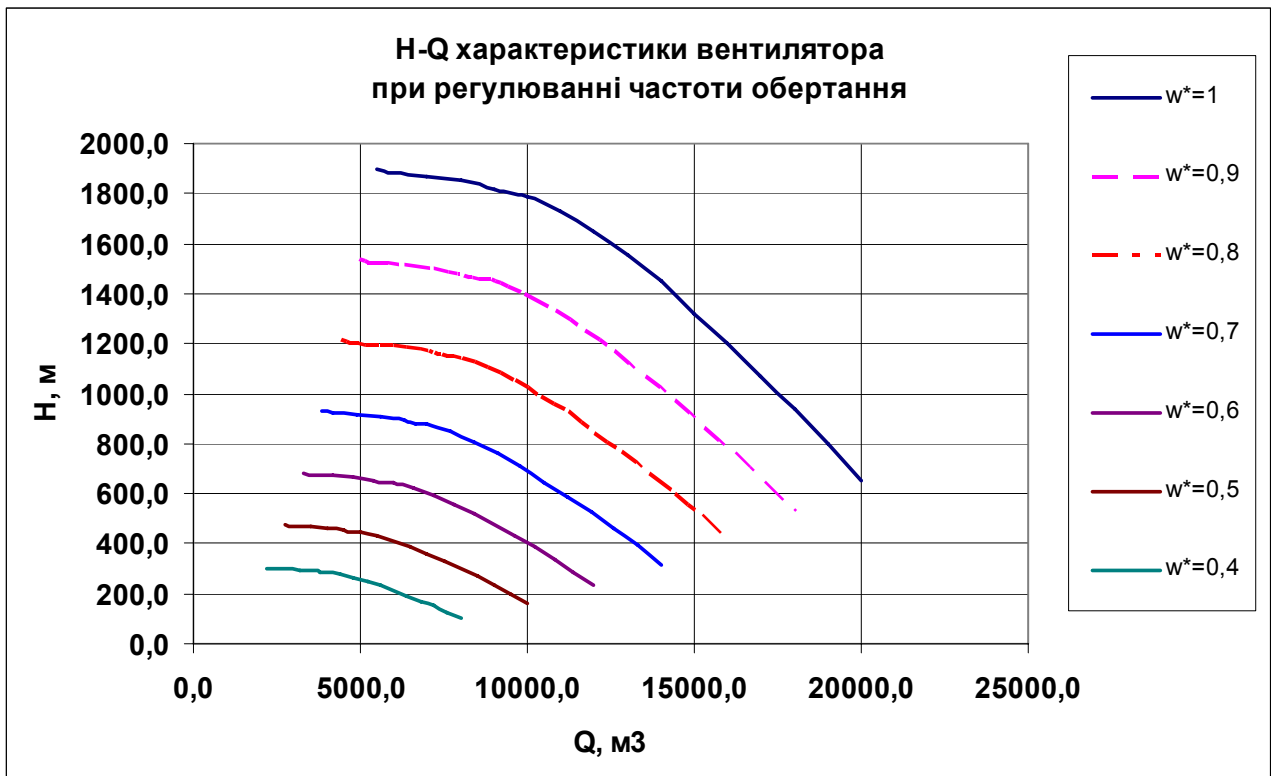


Рисунок 1.5 - Н-Q-характеристики вентилятора ВРАН9-6,3 при регулюванні частоти обертання

Таблиця 1.2

H-Q характеристики вентилятора при регулюванні частоти обертання

Частота обертання ω_n									
1,0 ω_n		0,9 ω_n		0,8 ω_n		0,7 ω_n		0,6 ω_n	
H, м	Q, м3/ч	H, м	Q, м3/ч	H, м	Q, м3/ч	H, м	Q, м3/ч	H, м	Q, м3/ч
1900	5500	1539	4950	1216	4400	931	3850	684	3300
1880	6000	1523	5400	1203	4800	921	4200	677	3600
1870	7000	1515	6300	1197	5600	916	4900	673	4200
1850	8000	1499	7200	1184	6400	907	5600	666	4800
1820	9000	1474	8100	1165	7200	892	6300	655	5400
1800	9500	1458	8550	1152	7600	882	6650	648	5700
1790	10000	1450	9000	1146	8000	877	7000	644	6000
1730	11000	1401	9900	1107	8800	848	7700	623	6600
1650	12000	1337	10800	1056	9600	809	8400	594	7200
1550	13000	1256	11700	992	10400	760	9100	558	7800
1450	14000	1175	12600	928	11200	711	9800	522	8400
1320	15000	1069	13500	845	12000	647	10500	475	9000
1200	16000	972	14400	768	12800	588	11200	432	9600
1070	17000	867	15300	685	13600	524	11900	385	10200
940	18000	761	16200	602	14400	461	12600	338	10800
800	19000	648	17100	512	15200	392	13300	288	11400
650	20000	527	18000	416	16000	319	14000	234	12000
0,5 ω_n		0,4 ω_n							
H, м	Q, м3/ч	H, м	Q, м3/ч	H, м	Q, м3/ч	H, м	Q, м3/ч	H, м	Q, м3/ч
475	2750	304	2200						
470	3000	301	2400						
468	3500	299	2800						
463	4000	296	3200						
455	4500	291	3600						
450	4750	288	3800						
448	5000	286	4000						
433	5500	277	4400						
413	6000	264	4800						
388	6500	248	5200						
363	7000	232	5600						
330	7500	211	6000						
300	8000	192	6400						
268	8500	171	6800						
235	9000	150	7200						
200	9500	128	7600						
163	10000	104	8000						

В табл. 1.3. надані результати розрахунків потужності вентилятора при різних подачах та приведені значення ккд у відповідності до аеродинамічних характеристик (рис. 1.5), а на рис. 1.6 наведені графічні залежності. Розрахунок потужності проводився за наступною формулою:

$$P = \frac{Q H}{\eta_B \eta_P},$$

де Q –подача вентилятора, м³/год;

H - напір вентилятора, м;

η_H –коефіцієнт корисної дії вентилятора;

η_P - коефіцієнт корисної дії редуктора або іншої механічної передачі..

Так яку вибраному вентиляторі здійснено безпосереднє з'єднання валу двигуна з робочим колесом вентилятора $\eta_P=1$.

Таблиця 1.3
Залежність ккд та потужності
вентилятора від подачі

Q, м3/ч	ккд	P, Вт
5500	0,64	4535,59
6000	0,67	4676,62
7000	0,71	5121,28
8000	0,75	5481,48
9000	0,78	5833,33
9500	0,79	6012,66
10000	0,8	6215,28
11000	0,815	6486,03
12000	0,82	6707,32
13000	0,82	6825,88
14000	0,81	6961,59
15000	0,79	6962,03
16000	0,765	6971,68
17000	0,73	6921,61
18000	0,69	6811,59
19000	0,64	6597,22
20000	0,58	6226,05

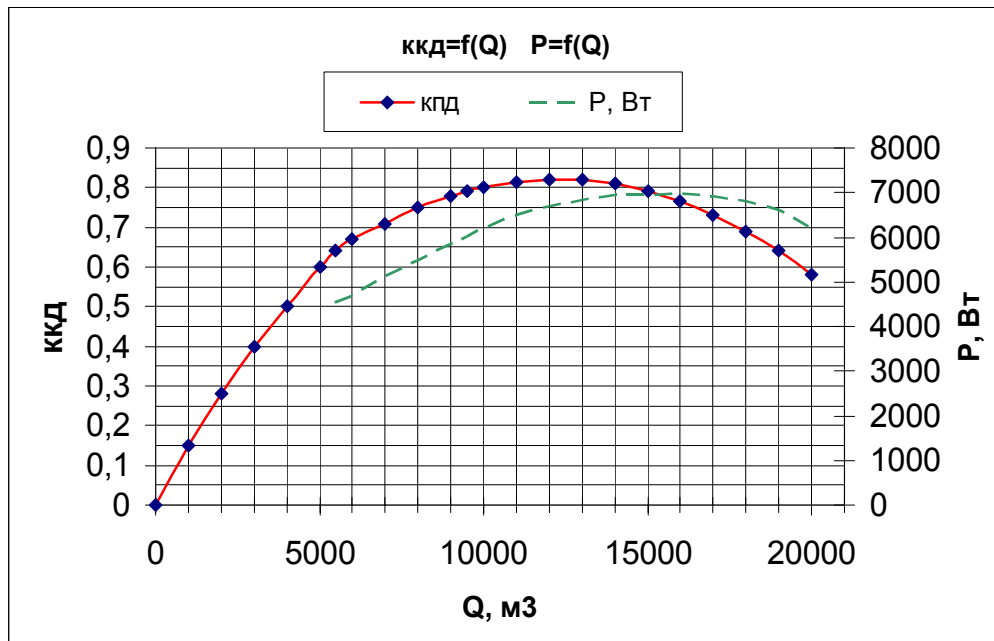


Рисунок 1.6 – Графіки залежності ккд та потужності вентилятора ВРАН9-6,3 від його продуктивності

Для дослідження паралельної роботи вентиляторів побудуємо на одному графіку $H-Q$ характеристики одного вентилятора та сумарні характеристики двох вентиляторів (табл. 1.5.), що працюють паралельно з регулюванням частоти обертання (рис. 1.7). Сумарні характеристики отримаємо шляхом складання подач вентиляторів при фіксованому значенні напору. Також на графіку надано $H-Q$ характеристику мережі, числові дані якої наведені у табл. 1.4.

Таблиця 1.4

$H-Q$ характеристика мережі

Q, м3/ч	H, м
0	100
2000	115
5000	198
7000	296
9000	429
11000	599
12000	698
14000	922
16000	1184
18000	1483
19000	1647
20000	1820
22000	2195

Таблиця 1.5

Результуючі $H-Q$ характеристики вентиляторів при паралельній роботі та регулюванні частоти обертання

Частота обертання ω_n									
1,0 ω_n		0,9 ω_n		0,8 ω_n		0,7 ω_n		0,6 ω_n	
H, м	Q, м ³ /ч	H, м	Q, м ³ /ч	H, м	Q, м ³ /ч	H, м	Q, м ³ /ч	H, м	Q, м ³ /ч
1900	11000	1539	9900	1216	8800	931	7700	684	6600
1880	12000	1523	10800	1203	9600	921	8400	677	7200
1870	14000	1515	12600	1197	11200	916	9800	673	8400
1850	16000	1499	14400	1184	12800	907	11200	666	9600
1820	18000	1474	16200	1165	14400	892	12600	655	10800
1800	19000	1458	17100	1152	15200	882	13300	648	11400
1790	20000	1450	18000	1146	16000	877	14000	644	12000
1730	22000	1401	19800	1107	17600	848	15400	623	13200
1650	24000	1337	21600	1056	19200	809	16800	594	14400
1550	26000	1256	23400	992	20800	760	18200	558	15600
1450	28000	1175	25200	928	22400	711	19600	522	16800
1320	30000	1069	27000	845	24000	647	21000	475	18000
1200	32000	972	28800	768	25600	588	22400	432	19200
1070	34000	867	30600	685	27200	524	23800	385	20400
940	36000	761	32400	602	28800	461	25200	338	21600
800	38000	648	34200	512	30400	392	26600	288	22800
650	40000	527	36000	416	32000	319	28000	234	24000
0,5 ω_n		0,4 ω_n							
H, м	Q, м ³ /ч	H, м	Q, м ³ /ч	H, м	Q, м ³ /ч	H, м	Q, м ³ /ч	H, м	Q, м ³ /ч
475	5500	304	4400						
470	6000	301	4800						
468	7000	299	5600						
463	8000	296	6400						
455	9000	291	7200						
450	9500	288	7600						
448	10000	286	8000						
433	11000	277	8800						
413	12000	264	9600						
388	13000	248	10400						
363	14000	232	11200						
330	15000	211	12000						
300	16000	192	12800						
268	17000	171	13600						
235	18000	150	14400						
200	19000	128	15200						
163	20000	104	16000						

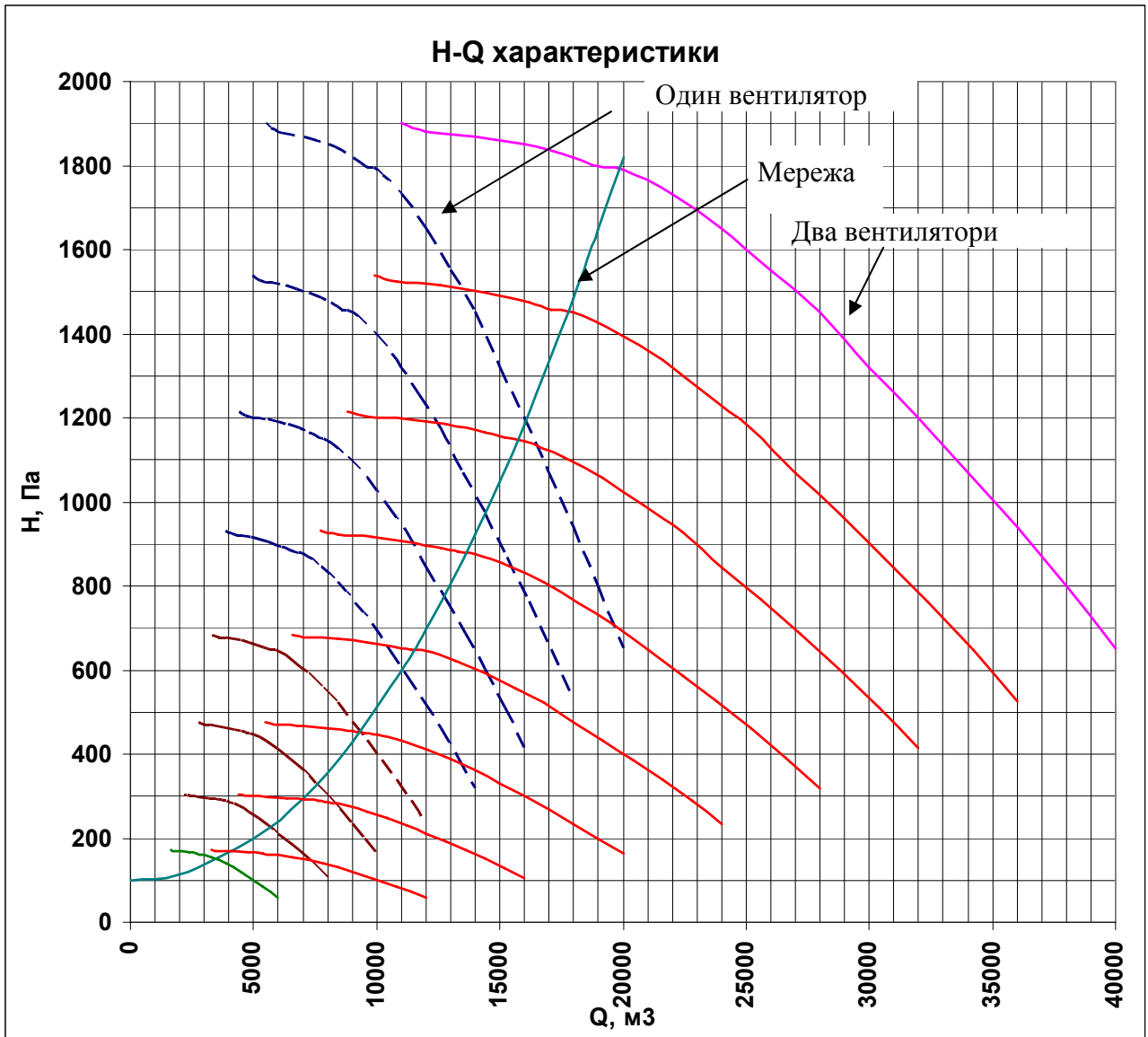


Рисунок 1.7 - $H-Q$ характеристики одного вентилятора та сумарні характеристики двох вентиляторів, що працюють паралельно

2. ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ВЕНТИЛЯТОРІВ

Частотно-керований електропривод вентиляторів використовується доволі давно, ще з моменту появи перших перетворювачів частоти (ПЧ). Регулювання швидкості вентиляторів здійснюється у невеликому діапазоні, приблизно 40:1. Оскільки вентилятор має квадратичну залежність моменту опору від швидкості обертання, то для нього використовується так званий квадратичний закон частотного керування $U/f^2 = const$ [11, 13, 16]. Даний закон показує у якому співвідношенні повинні знаходитись частота та рівень напруги на виході ПЧ. Як правило використовуються розімкнені системи частотного керування (без зворотних зв'язків за швидкістю). При доволі точному підтриманні співвідношення $U/f^2 = const$, що забезпечують всі сучасні перетворювачі, природної жорсткості механічної характеристики асинхронного двигуна цілком достатньо, щоб забезпечити зазначений діапазон регулювання. Функціональна схема системи частотного керування показана на рис.2.1.

Функціональна схема має задавач інтенсивності $ЗІ$, блок обмеження $БО$, функціональний перетворювач $ФП$, формувач струму $ФТ$, нелінійна ланка $НЗ$, перетворювач частоти $ПЧ$, асинхронний двигун с короткозамкненим ротором $АД$.

Задавач інтенсивності $ЗІ$ формує сигнал завдання на швидкість обертання, який на виході обмежується блоком $БО$. Сигнал $ЗІ$ є завданням на синхронну частоту обертання двигуна (частоту живлячої напруги на виході ПЧ). Сигнал з виходу $БО$ поступає на вхід функціонального перетворювача $ФП$, що реалізує залежність між частотою та напругою у відповідності з заданим законом вольт-частотного керування. На виході перетворювача маємо сигнал завдання на напругу на виході $ПЧ$. Перетворювач частоти формує на виході напругу заданої амплітуди і частоти, яка подається на $АД$ і визначає швидкість його обертання. Блок $ФТ$ по сигналам датчиків струму визначає амплітуду

струму статора I_1 . Сигнал струму використовується для введення позитивного зворотного зв'язку за струмом і реалізації IR -компенсації [6, 15] (сигнал U_{IR}). Ступень компенсації налагоджується коефіцієнтом K_1 . Також сигнал струму використовується для захисту ПЧ і АД от перевантаження за струмом шляхом реалізації *струмової відсічки*. Нелінійний елемент НЗ має характеристику типу “зона нечутливості”. При перевищенні струмом заданого максимального значення сигнал на виході НЗ ($U_{огр} / K_2$) різко збільшується і зменшує сигнал завдання на напругу и частоту ПЧ. Даний канал також має налагоджувальний коефіцієнт K_2 .

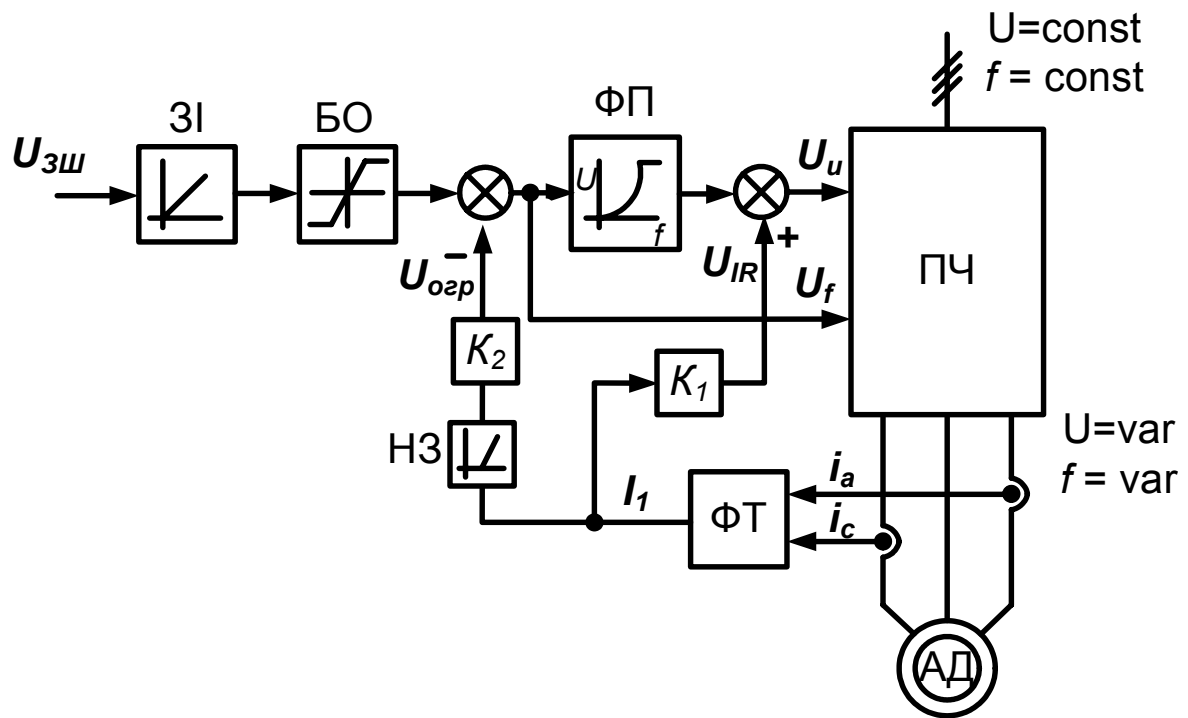


Рисунок 2.1- Функціональна схема системи частотного керування

2.1 Розробка математичної моделі двигуна

Для дослідження роботи асинхронного короткозамкненого двигуна (АД) при частотному керуванні підходить модель, яка може бути отримана представленням рівнянь АД в системі координат x - y , пов'язаній дійсною віссю

x з вектором напруги статора, яка обертається з синхронною швидкістю. Система координат x - y є комплексною прямокутною системою координат, в якій вісь x дійсна, а вісь y – уявна та випереджає вісь x на 90° .

Вихідними рівняннями для побудови моделі будуть:

$$\bar{U}_s = \bar{I}_s R_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + j\omega_c \bar{\Psi}_s,$$

$$\bar{U}_r = \bar{I}_r R_r + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_c - \omega Z)\bar{\Psi}_r.$$

$$\bar{\Psi}_s = \bar{I}_s L_s + \bar{I}_r L_m,$$

$$\bar{\Psi}_r = \bar{I}_s L_m + \bar{I}_r L_r,$$

де $\bar{U}_s, \bar{I}_s, \bar{\Psi}_s$ – узагальнені вектори напруги, струму і потокозчеплення статора; $\bar{U}_r, \bar{I}_r, \bar{\Psi}_r$ – узагальнені вектори напруги, струму і потокозчеплення статора ротора; R_s, R_r – активні опори статора і ротора; ω_c – швидкість обертання системи координат; ω – механічна швидкість обертання ротора; L_s, L_r, L_m – індуктивність статора, ротора і взаємна індуктивність статора і ротора відповідно; $j = \sqrt{-1}$, Z – число пар полюсів.

Визначимо з рівнянь потокозчеплення струми статора і ротора.

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{\Psi}_s - \bar{I}_r L_m}{L_s},$$

$$\bar{I}_r = \frac{\bar{\Psi}_r - \bar{I}_s L_m}{L_r},$$

Виконаємо взаємну підстановку

$$\bar{I}_s = \frac{1}{L_s} (\bar{\Psi}_s - L_m \left[\frac{\bar{\Psi}_r - \bar{I}_s L_m}{L_r} \right])$$

Помножимо обидві частини рівняння на $L_s L_r$ і отримаємо наступний вираз:

$$\bar{I}_s = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (\bar{\Psi}_s L_r - \bar{\Psi}_r L_m)$$

Аналогічно знайдемо струм ротора:

$$\bar{I}_r = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (\bar{\Psi}_r L_s - \bar{\Psi}_s L_m)$$

Підставимо отримані рівняння для струму в перші два рівняння системи:

$$\bar{U}_s = R_s \left[\frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (\bar{\Psi}_s L_r - \bar{\Psi}_r L_m) \right] + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + j\omega_c \bar{\Psi}_s,$$

$$\bar{U}_r = R_r \left[\frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (\bar{\Psi}_r L_s - \bar{\Psi}_s L_m) \right] + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_c - \omega Z) \bar{\Psi}_r.$$

Виконаємо заміну $\frac{d}{dt} \rightarrow p$, та попередньо представивши рівняння в формі Каші, отримаємо:

$$\bar{\Psi}_s = \frac{1}{p} \left[\bar{U}_s - R_s \left(\frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (\bar{\Psi}_s L_r - \bar{\Psi}_r L_m) \right) - j\omega_c \bar{\Psi}_s \right],$$

$$\bar{\Psi}_r = \frac{1}{p} \left[\bar{U}_r - R_r \left(\frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (\bar{\Psi}_r L_s - \bar{\Psi}_s L_m) \right) - j(\omega_c - \omega Z) \bar{\Psi}_r \right].$$

Розкладемо векторні рівняння за проекціями на осі x - y :

$$\Psi_{sx} = \frac{1}{p} \left[U_{sx} - R_s \left(\frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (\Psi_{sx} L_r - \Psi_{rx} L_m) \right) + \omega_c \Psi_{sy} \right]$$

$$\Psi_{sy} = \frac{1}{p} \left[U_{sy} - R_s \left(\frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (\Psi_{sy} L_r - \bar{\Psi}_{ry} L_m) \right) - \omega_c \Psi_{sx} \right]$$

$$\Psi_{rx} = \frac{1}{p} \left[U_{rx} - R_r \left(\frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (\Psi_{rx} L_s - \Psi_{sx} L_m) \right) + j(\omega_c - \omega Z) \Psi_{ry} \right]$$

$$\Psi_{ry} = \frac{1}{p} \left[U_{ry} - R_r \left(\frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (\Psi_{ry} L_s - \Psi_{sy} L_m) \right) - j(\omega_c - \omega Z) \Psi_{rx} \right]$$

Отримані вирази описують електромагнітні процеси в статорі і роторі. Для повноти опису додамо рівняння для моменту і рівняння механічного руху:

$$M = \frac{3}{2} Z \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} (\Psi_{sy} \Psi_{rx} - \Psi_{ry} \Psi_{sx})$$

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$$

Структурна схема асинхронного двигуна для частотного керування при живленні від джерела напруги, побудована за наведеними рівняннями, представлена на рис. 2.2.

Для проведення розрахунків необхідно визначити параметри двигуна у абсолютних одиницях, а також розрахувати номінальний момент, струм, потокозчеплення. У табл. 2.1. наведені дані асинхронного короткозамкненого двигуна [10], який використовується у приводі вентиляторів, що розглядаються.

Номінальний момент двигуна визначимо за формулою:

$$M_n = \frac{9,55 \cdot P_n}{n_0 \cdot (1 - s_n)} = \frac{9,55 \cdot 7500}{n_0 \cdot (1 - s_n)} = 49,2 \text{ Нм},$$

де P_n – номінальна потужність електродвигуна; Вт; n_0 – синхронна швидкість поля статора, об/хв; s_n – номінальне ковзання електродвигуна.

Номінальний фазний струм статора:

$$I_{\phi n} = \frac{P_n}{3 \cdot U_{\phi n} \cdot \eta_n \cdot \cos \varphi_n} = \frac{7500}{3 \cdot 220 \cdot 0,875 \cdot 0,86} = 15,1 \text{ А},$$

де $U_{\phi n}$ – номінальна фазна напруга двигуна; В; η_n – номінальний ККД двигуна; $\cos \varphi_n$ – номінальний коефіцієнт потужності двигуна.

Таблиця 2.1

Вихідні дані асинхронного двигуна

Тип двигуна	4A132S4Y3
Номінальна потужність P_n , кВт	7,5
Номінальна фазна напруга $U_{\phi n}$, В	220
Номінальний ККД η_n	0,875
Номінальний $\cos \varphi_n$	0,86
Момент інерції J , кг*м ²	0,028
Число пар полюсів Z_p	2
Номінальне ковзання s_n	0,029
Активний опір статора R_s^* , в.о.	0,048
Зведений активний опір ротора R_r^* , в.о.	0,033
Індуктивний опір статора X_s^* , в.о.	0,085
Зведений індуктивний опір ротора X_r^* , в.о.	0,13
Індуктивний опір повітряного зазору X_μ^* , в.о.	3

Номинальна швидкість обертання двигуна n_H дорівнює, об/хв:

$$n_H = n_0(1 - s_H) = 1500 \times (1 - 0,029) = 1460 \text{ об/хв.}$$

Номинальна кутова частота обертання двигуна:

$$\omega_H = \frac{\pi \times n_H}{30} = \frac{3,1415 \times 1460}{30} = 152,9 \text{ рад/с.}$$

Для переводу опорів з відносних одиниць в абсолютні скористаємося виразом:

$$Z = Z^* \cdot Z_B = Z^* \cdot \frac{U_{\phi H}}{I_{\phi H}}$$

де $Z_B = \frac{U_{\phi H}}{I_{\phi H}}$ – базовий опір; Ом; Z^* – опір у відносних одиницях; Z – шуканий опір, Ом.

Визначимо базовий опір:

$$Z_B = \frac{U_{\phi H}}{I_{\phi H}} = \frac{220}{15,1} = 14,57 \text{ Ом}$$

Активний опір статора:

$$R_S = 0,048 \times 14,57 = 0,7 \text{ Ом}$$

Активний опір ротора:

$$R_r = 0,033 \times 14,57 = 0,48 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір статора:

$$X_S = 0,085 \times 14,57 = 1,24 \text{ Ом,}$$

Індуктивний опір ротора:

$$X_r = 0,13 \times 14,57 = 1,9 \text{ Ом,}$$

Індуктивний опір кола намагнічування:

$$X_{\mu} = 3 \times 14,57 = 43,71 \text{ Ом},$$

Індуктивний опір короткого замикання:

$$X_K = X_S + X_r = 1,24 + 1,9 = 3,14 \text{ Ом}.$$

Частота живлячої мережі:

$$\omega_0 = 2 \pi f = 2 \pi \times 50 = 314,159 \text{ с}^{-1}$$

Індуктивність розсіювання обмотки статора:

$$L_{s\sigma} = X_s / \omega_0 = 1,24 / 314,159 = 0,004 \text{ Гн},$$

де $\omega_0 = 2 \pi f$ – кутова частота живлячої мережі, рад/с; $f = 50 \text{ Гц}$ – номінальна частота живлячої мережі.

Індуктивність розсіювання обмотки ротора:

$$L_{r\sigma} = X_r / \omega_0 = 1,9 / 314,159 = 0,006 \text{ Гн}.$$

Максимальна взаємна індуктивність між обмотками статора и ротора:

$$L_m = X_{\mu} / \omega_0 = 43,71 / 314,159 = 0,139 \text{ Гн}.$$

Повна індуктивність обмотки статора:

$$L_{1s} = L_{s\sigma} + L_m = 0,004 + 0,139 = 0,143 \text{ Гн}.$$

Повна індуктивність обмотки ротора:

$$L_r = L_{r\sigma} + L_m = 0,006 + 0,139 = 0,145 \text{ Гн}.$$

Розраховані параметри двигуна зведені до табл. 2.2

Таблиця 2.2

Дані двигуна 4A132S4У3

Активний опір статора R_s , Ом	0,7
Зведений активний опір ротора R_r , Ом	0,48
Індуктивність обмотки статора L_s , Гн	0,143
Індуктивність обмотки ротора L_r , Гн	0,145
Індуктивність намагнічування L_m , Гн	0,139
Номінальний момент M_n , Нм	49,2
Номінальний фазний струм $I_{\phi n}$, А	15,1
Номінальна частота обертання ω_n , рад/с	152,9

2.2 Механічні характеристики асинхронного двигуна при вольт-частотному керуванні

При частотному регулюванні турбомеханізмів, момент статичного опору яких зменшується із зменшенням частоти та швидкості обертання, немає необхідності постійно підтримувати критичний момент. Для того, щоб жорсткість механічних характеристик не змінювалась, а критичний момент змінювався пропорційно швидкості обертання, необхідно одночасно з частотою змінювати напругу живлення, так щоб їх співвідношення залишалось постійним за законом $\frac{U}{f^2} = const$, звідки $U = f^2 * K$:

$$K_U = \frac{U_{\phi n}}{f_n^2} = \frac{220}{50^2} = 0,088.$$

Для побудови механічних характеристик для різних частот живлячої напруги скористаємося формулою:

$$M = \frac{3 \cdot (U_{\phi n} \cdot (f^*)^2)^2 \cdot \frac{R_2'}{s}}{\omega_{0n} f^* \left[\left(R_1 + C_F \frac{R_2'}{s} \right)^2 + f^{*2} (X_1 + C_F X_2')^2 \right]}.$$

Здамося декількома значеннями частот живлячою напруги, для яких будемо будувати механічні характеристики:

$$f = [5 \ 10 \ 20 \ 30 \ 40 \ 50] \text{ Гц.}$$

Визначимо відносне значення (в.о.) частоти живлячої напруги, поділив значення заданої частоти на значення частоти живлячої мережі:

$$f^* = \frac{f}{f_H} = [0,1 \ 0,2 \ 0,4 \ 0,6 \ 0,8 \ 1] \text{ о.е.}$$

Для розрахунків також необхідно визначити коефіцієнт C_F , який характеризує відношення напруги статора до напруги на зажитих контуру намагнічування при синхронному ході двигуна [8]:

$$C_F = \frac{1}{X_{\mu}^2 f^*} \sqrt{A + B},$$

$$A = \left[(X_1 + X_{\mu}) X_{\mu} f^{*2} \right]^2,$$

$$B = \left[(R_1) X_{\mu} f^* \right]^2.$$

Частоту обертання у функції ковзання знайдемо як:

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s).$$

Для розрахунків будемо задаватися ковзанням у діапазоні [0..1]. Для розрахунку скористаємося пакетом MATLAB. Отримані результати у вигляді графіку представлені на рис. 2.2. У додатку 2 наведено код програми для розрахунків та побудови графіків.

На рис. 2.2 також наведена механічна характеристика опору вентилятора, яка розраховувалася за наступною формулою:

$$M_C = \frac{Q H}{3600 \eta (\omega^* \times \omega_H) n},$$

де Q – продуктивність вентилятора, м³/час; H – тиск, м; η_H – ккд вентилятора; ω^* – відносна частота обертання; ω_H – номінальна частота обертання; n – кількість паралельно працюючих вентиляторів.

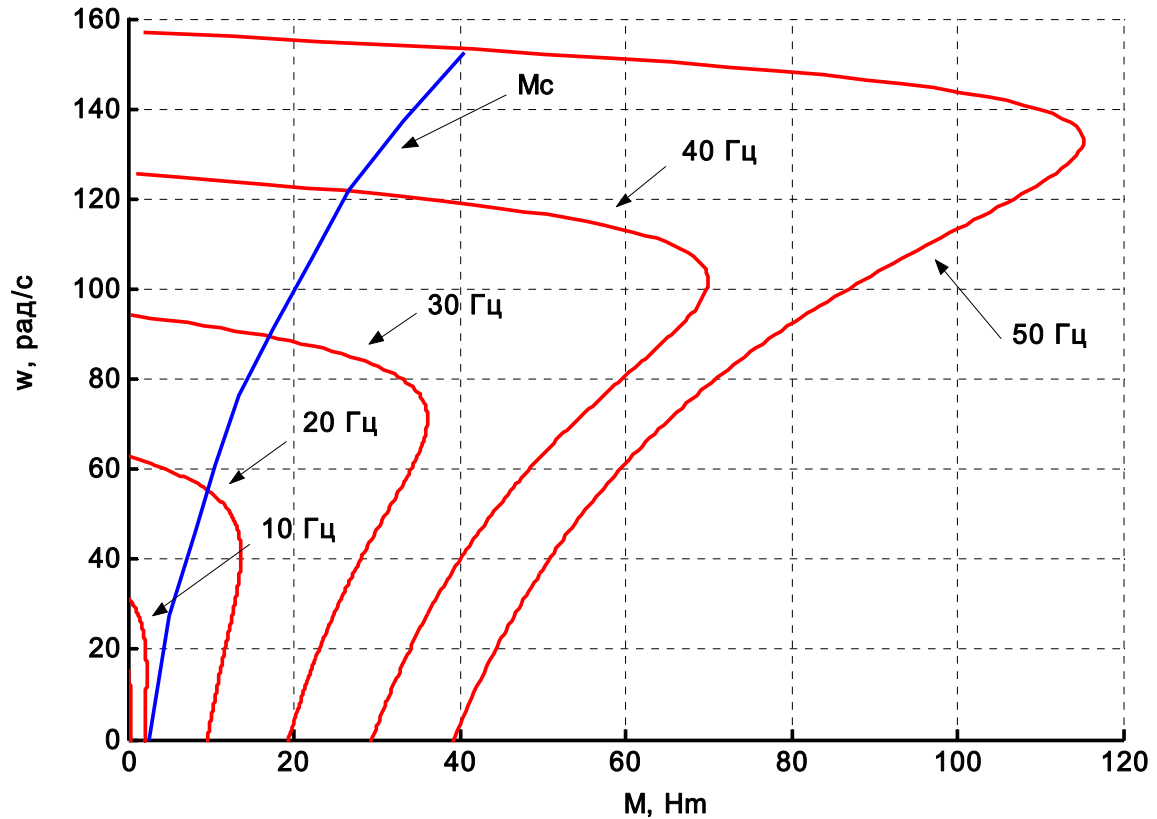


Рисунок 2.3 - Механічні характеристики асинхронного двигуна при частотному керуванні та момент статичного опору вентилятора

Для побудови характеристики скористаємося даними з розділу 1, рис. 1.6 та рис. 1.7. Всі дані представимо у табл. 2.3.

Значення $2Q$ та H отримані як ординати та абсциси точок перетину характеристики мережі та сумарних характеристик двох вентиляторів на рис. 1.7.

При паралельній роботі вентиляторів можливо реалізувати два варіанти живлення двигунів: від одного загального перетворювача або від окремих перетворювачів. Розглянемо обидва варіанти.

Таблиця 2.3
Механічна характеристика вентилятора

ω^*	$\frac{2Q}{\text{м}^3/\text{год}}$	$\frac{Q}{\text{м}^3/\text{год}}$	$H, \text{ м}$	η	$\frac{M_c}{\text{Нм}}$
1	19800	9900	1800	0,8	40,47
0,9	17800	8900	1450	0,785	33,18
0,8	15800	7900	1150	0,775	26,62
0,7	13600	6800	880	0,7	22,19
0,6	11600	5800	650	0,65	17,56
0,5	9400	4700	450	0,57	13,48
0,4	7000	3500	300	0,45	10,60
0,3	4400	2200	180	0,3	7,99
0,18					5
0					2,5

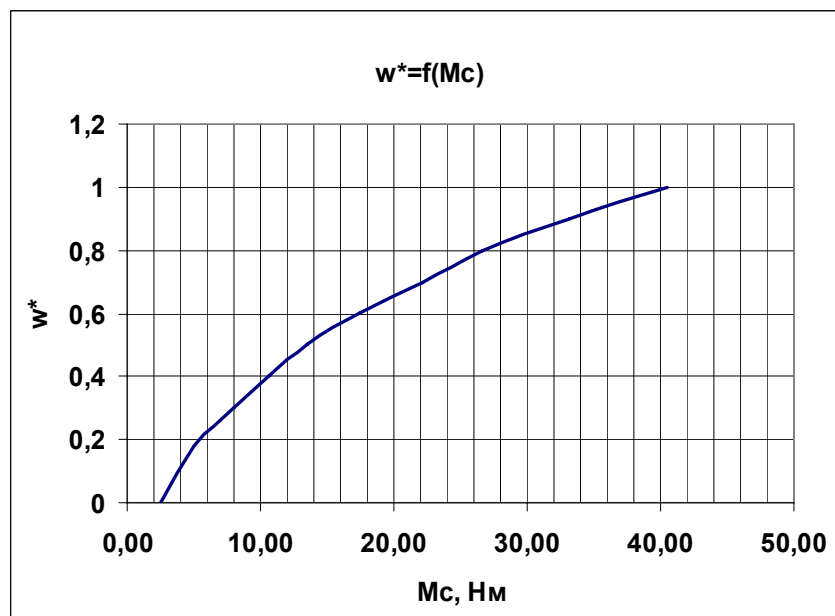


Рисунок 2.4 – Характеристика моменту статичного опору вентилятора

При живленні від одного перетворювача (рис. 2.5, а) двигуни працюватимуть паралельно, живитимуться від одного джерела і обертатимуться майже з однаковими швидкостями. Відміни будуть обумовлені тільки різницею характеристик електричних машин. При цьому перетворювач здійснює загальний захист обох двигунів, тому для забезпечення індивідуального захисту необхідні додаткові пристрої. При виході з ладу перетворювача вся система зупиниться. Також у такому варіанті немає можливості впливати на режими роботи окремого вентилятора.

При живленні від окремих перетворювачів (рис. 2.5, б) система набуває більшої гнучкості. З'являється можливість керувати режимами роботи окремого вентилятора. Перетворювач здійснює захист окремого двигуна, при виході одного перетворювача з ладу і зупинці вентилятора, інший продовжує роботу. Але такий варіант може бути дещо дорожчий.

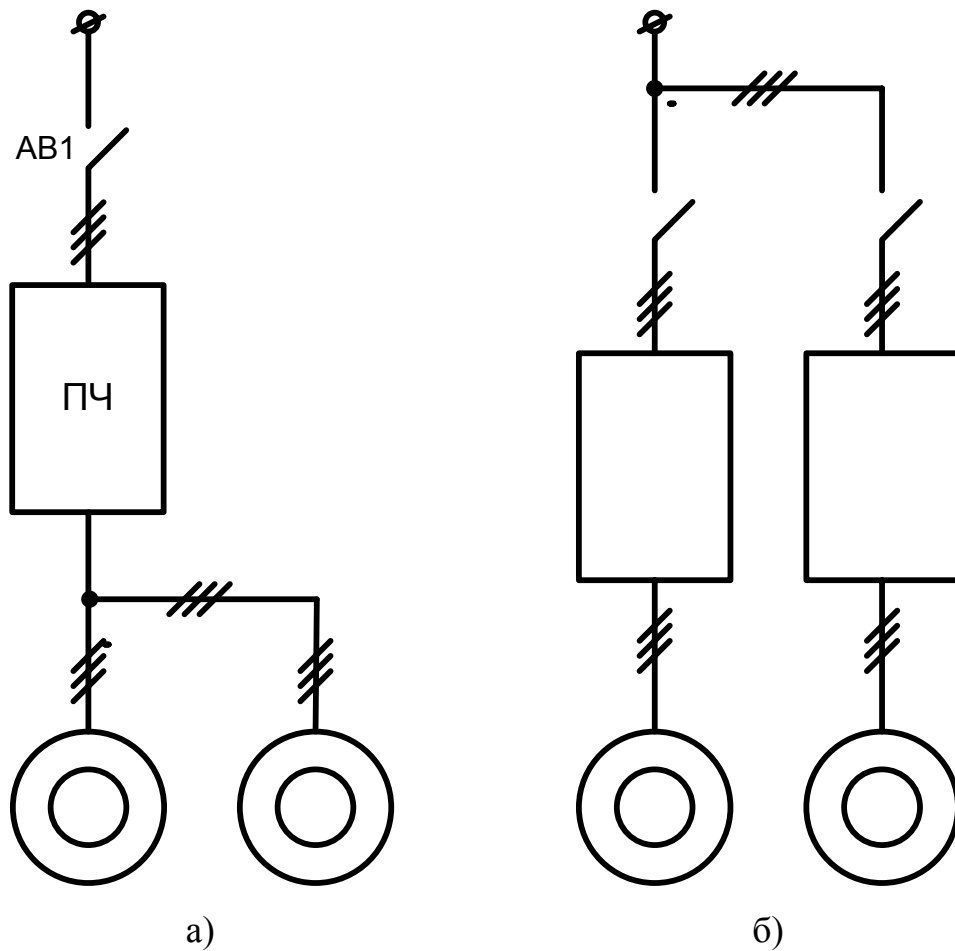


Рисунок 2.5 – Однолінійна схема підключення вентиляторів

3. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ВЕНТИЛЯТОРІВ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНІЙ РОБОТІ

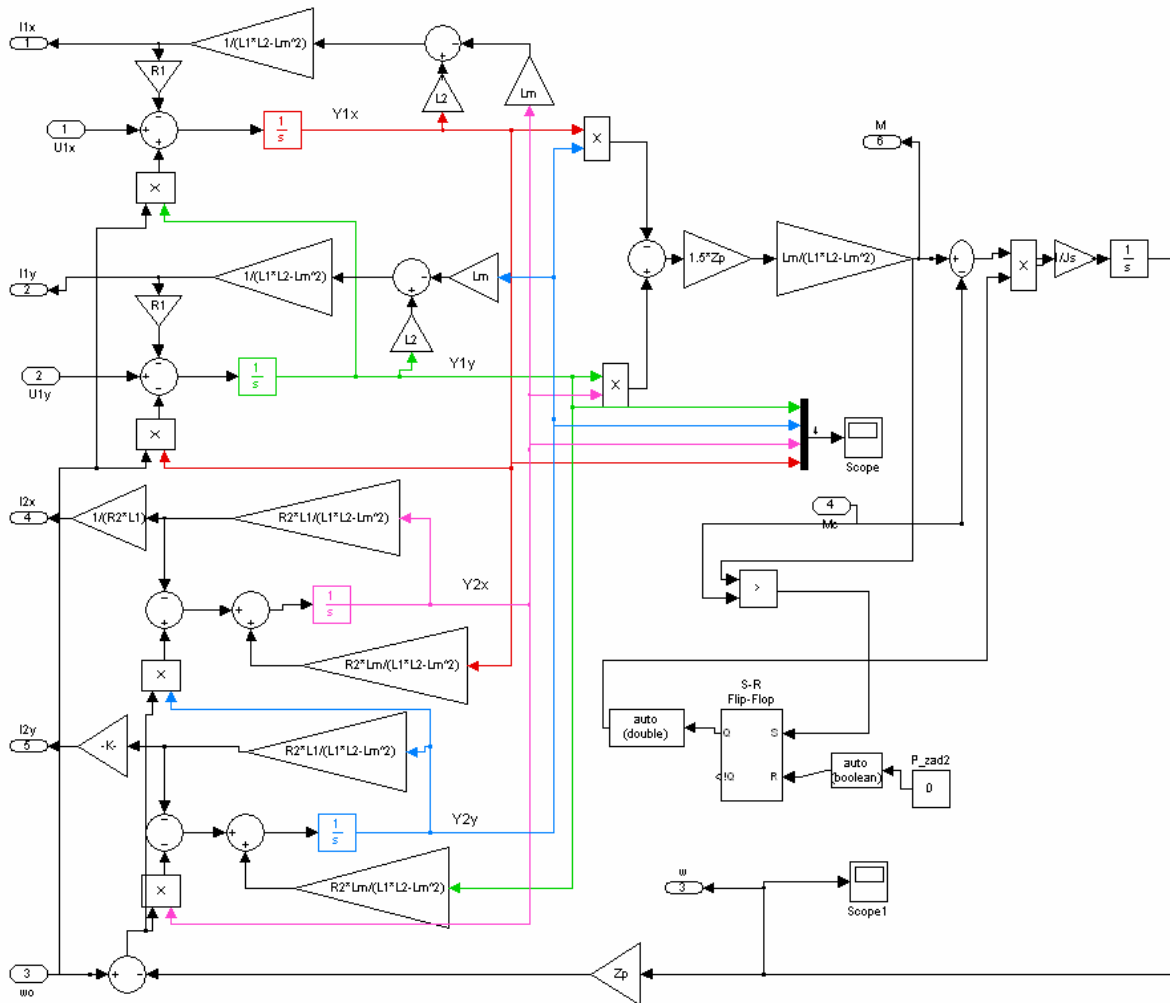
Дослідження режимів роботи електроприводів паралельно працюючих вентиляторів при квадратичному законі частотного керування ($U/f^2 = const$) здійснимо на математичній моделі. Для проведення досліджень використаємо середовище *Simulink* математичного пакету MathLab. Спочатку нам необхідно створити математичні моделі як двигуна, так і всіх необхідних додаткових елементів: навантаження (мережі), перетворювача, вентилятора.

3.1 Розробка математичної моделі

Модель двигуна в *Simulink*, яка побудована за приведеною на рис. 2.2 структурною схемою, представлена на рис. 3.1.

Загальна модель системи з двох паралельно підключених вентиляторів представлена на рис. 3.2. Вона складається з двох двигунів, які живляться від перетворювачів частоти. Перетворювачі реалізовані у вигляді аперіодичних ланок *PCh1* та *PCh2* з сталими часу 0,001 с. Блок перетворює сигнал завдання на частоту в сигнал синхронної частоти для двигуна, який подається на вхід ω_0 моделі двигуна. За допомогою блоку $U/f^2 = const$ сигнал частоти перетворюється на сигнал напруги, який подається на вхід U_{1x} моделі двигуна. Таким чином реалізується вольт частотне керування. Статична характеристика блоку має вигляд зображений на рис. 3.3. На початковому етапі при малих значеннях частот напруга має не нульове значення. Така залежність реалізована для підвищення початкового пускового моменту.

Момент статичного опору вентилятора реалізовано у вигляді одновимірної таблиці за даними з розділу 1. Вентилятор (сумарна характеристика) та мережу відтворено за допомогою м-функції. Порядок реалізації розглянуто в наступному параграфі.

Рисунок 3.1 – Модель двигуна в *Simulink*

В реалізованій моделі здійснюється одночасне керування обома двигунами. З виходу задавача інтенсивності $ZI3$ сигнал завдання поступає на входи перетворювачів. В системі реалізовано ПІД-регулювання витрати вентиляторів за допомогою стандартного блоку PID. Налаштування регулятора підбирались практичним шляхом.

Також в системі реалізовано вимірювання амплітуди фазного струму двигуна за наступною формулою:

$$I_{\phi max} = \sqrt{I_{Ix}^2 + I_{Iy}^2}$$

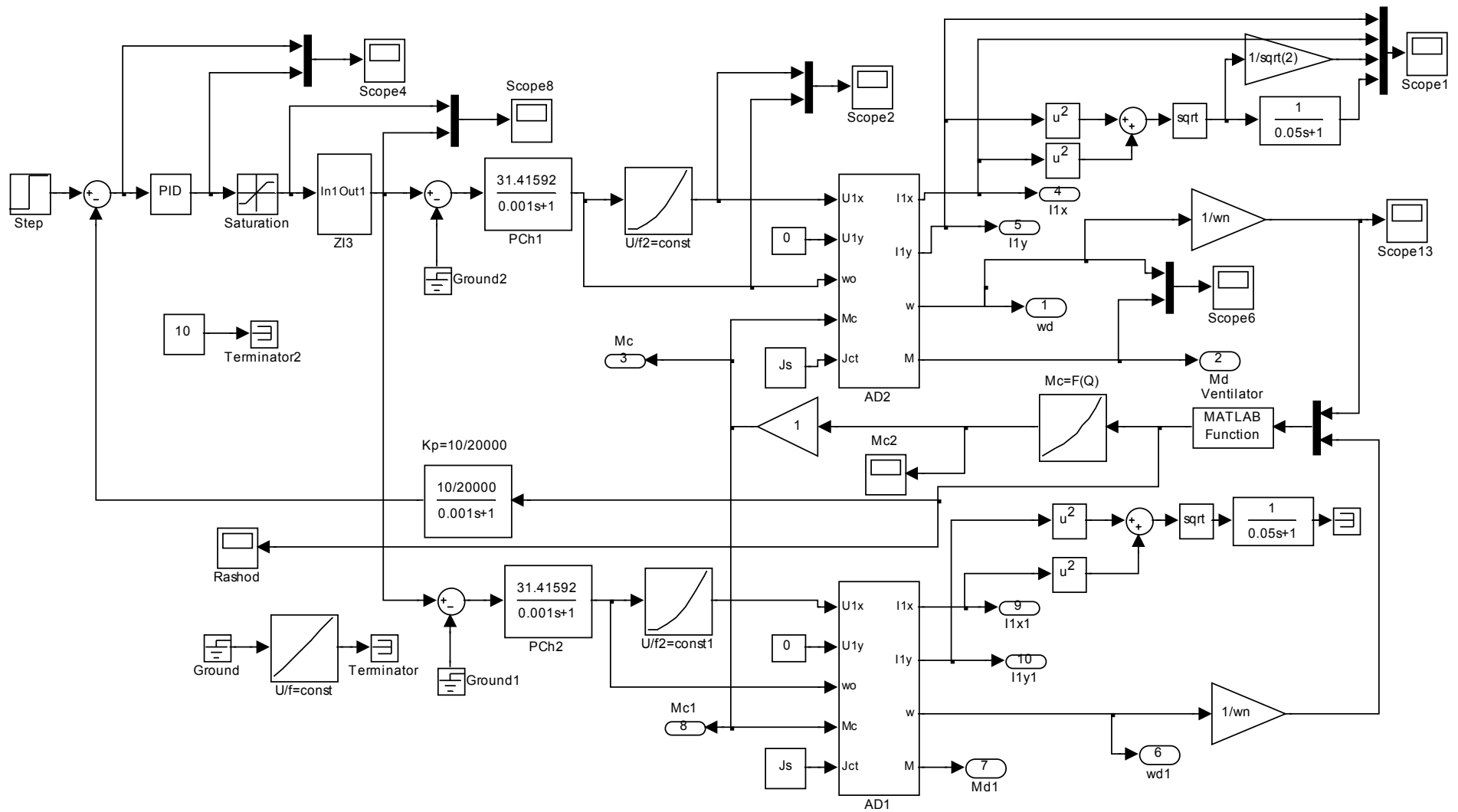


Рисунок 3.2 – Модель паралельної роботи вентиляторів з частотним керування

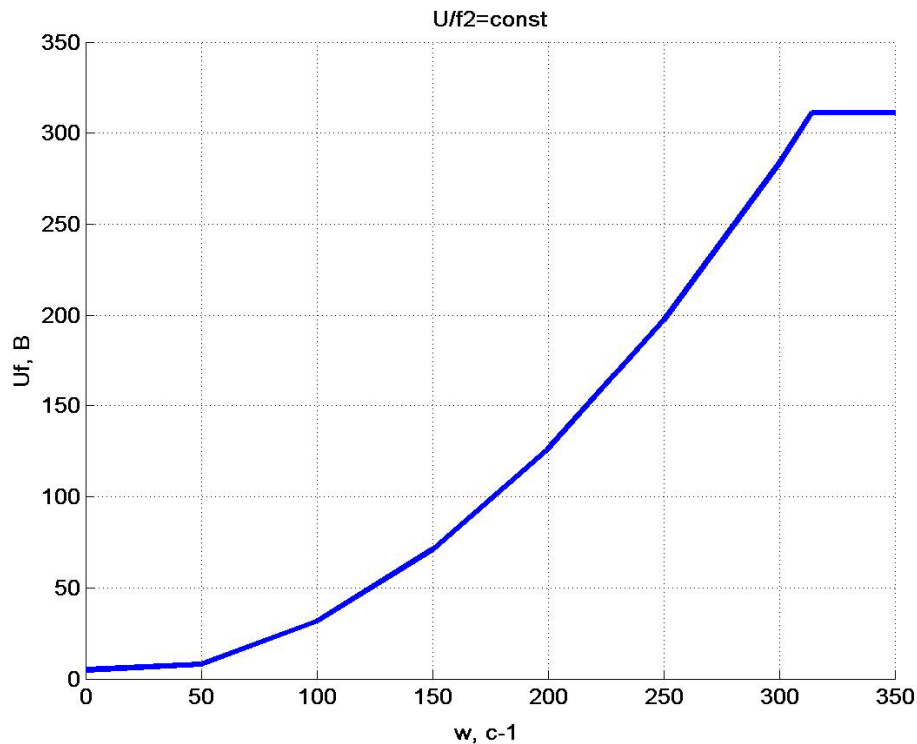


Рисунок 3.3 – Вольт-частотна характеристика до закону частотного регулювання $U/F^2 = const$

3.2 Математична модель вентилятора та мережі

Для побудови математичної моделі вентилятора скористаємося $H-Q$ характеристикою як одного вентилятора, так і результуючою $H-Q$ характеристикою вентиляторів при паралельній роботі та регулюванні частоти обертання (рис. 1.5 та рис. 1.7).

Для того, щоб отримати математичний опис характеристик вентилятора скористаємося програмою Excel і її функцією «Побудова лінії тренду». Функція «Побудова лінії тренду» здійснює апроксимацію (опис) деякого масиву даних математичною функцією заданого виду і відшукує коефіцієнти цієї функції. Для цього дані з розділу 1, що описують $H-Q$ характеристики, були отримані в Excel і за ними побудовані приведені в тому ж розділі 1 характеристики вентиляторів. Тепер за допомогою контекстного меню, зробив клік правою клавішею на лінії графіку, вибираємо пункт «Додати лінію тренда». Оскільки

графік $H-Q$ характеристики сильно нагадує перевернуту кубічну параболу на вкладці «Тип» виберемо тип лінії тренду «*Поліноміальний*» ступінь 3 (рис. 3.4).

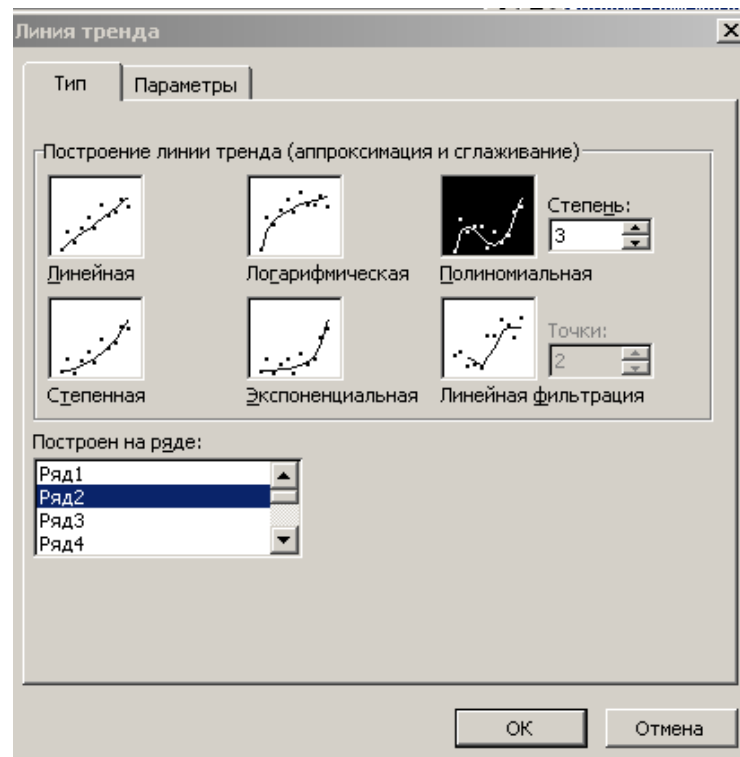


Рисунок 3.4 – Вибір типу лінії тренда

На вкладці «*Параметри*» (рис. 3.5) виберемо опцію «*Показати рівняння на діаграмі*».

Таким чином для кожної характеристики визначаємо рівняння, що пов'язує витрату та тиск, та його коефіцієнти (рис. 3.6).

В загальному вигляді рівняння можна представити як:

$$y = a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0.$$

Вхідним аргументом x рівнянь є витрата Q , а ординатою (вихідною змінною y) є тиск H . Аналіз рівнянь показує, що у них коефіцієнт a_2 однаковий, а всі інші відрізняються. Можна припустити, що вони залежать від відносної частоти обертання вентилятора ω^* . В такому разі рівняння може прийняти вигляд:

$$H = a_3(\omega^*)Q^3 + a_2(\omega^*)Q^2 + a_1(\omega^*)Q + a_0(\omega^*).$$

Зведемо значення коефіцієнтів a_3 , a_2 , a_1 , a_0 до таблиці в залежності від відносної частоти обертання (табл. 3.1). За наведеною таблицею побудуємо графіки і знайдемо рівняння залежностей коефіцієнтів від відносної швидкості (рис. 3.7 - рис. 3.9).

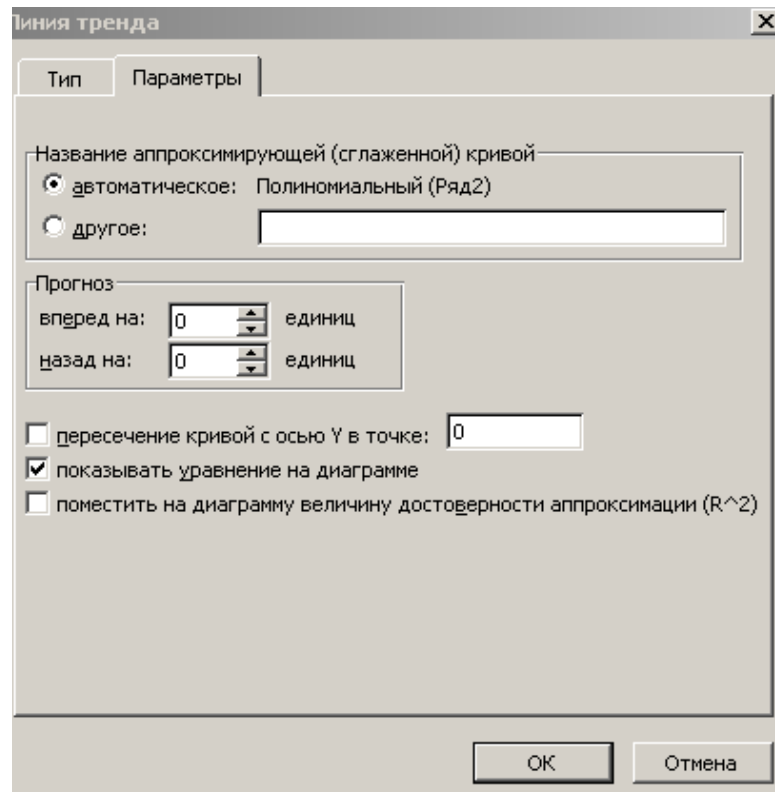


Рисунок 3.5 – Вибір параметрів лінії тренда

Таблица 3.1

Коефіцієнти рівняння $H-Q$ характеристики

ω^*	a_3	a_2	a_1	a_0
1	$2,0192 \times 10^{-11}$	$-3,0020 \times 10^{-6}$	$6,6924 \times 10^{-2}$	$1,4800 \times 10^3$
0,9	$2,2435 \times 10^{-11}$	$-3,0020 \times 10^{-6}$	$6,0231 \times 10^{-2}$	$1,1988 \times 10^3$
0,8	$2,5240 \times 10^{-11}$	$-3,0020 \times 10^{-6}$	$5,3539 \times 10^{-2}$	$9,4717 \times 10^2$
0,7	$2,8845 \times 10^{-11}$	$-3,0020 \times 10^{-6}$	$4,6847 \times 10^{-2}$	$7,2518 \times 10^2$
0,6	$3,3653 \times 10^{-11}$	$-3,0020 \times 10^{-6}$	$4,0154 \times 10^{-2}$	$5,3279 \times 10^2$
0,5	$4,0384 \times 10^{-11}$	$-3,0020 \times 10^{-6}$	$3,3462 \times 10^{-2}$	$3,6999 \times 10^2$
0,4	$5,0480 \times 10^{-11}$	$-3,0020 \times 10^{-6}$	$2,6769 \times 10^{-2}$	$2,3679 \times 10^2$

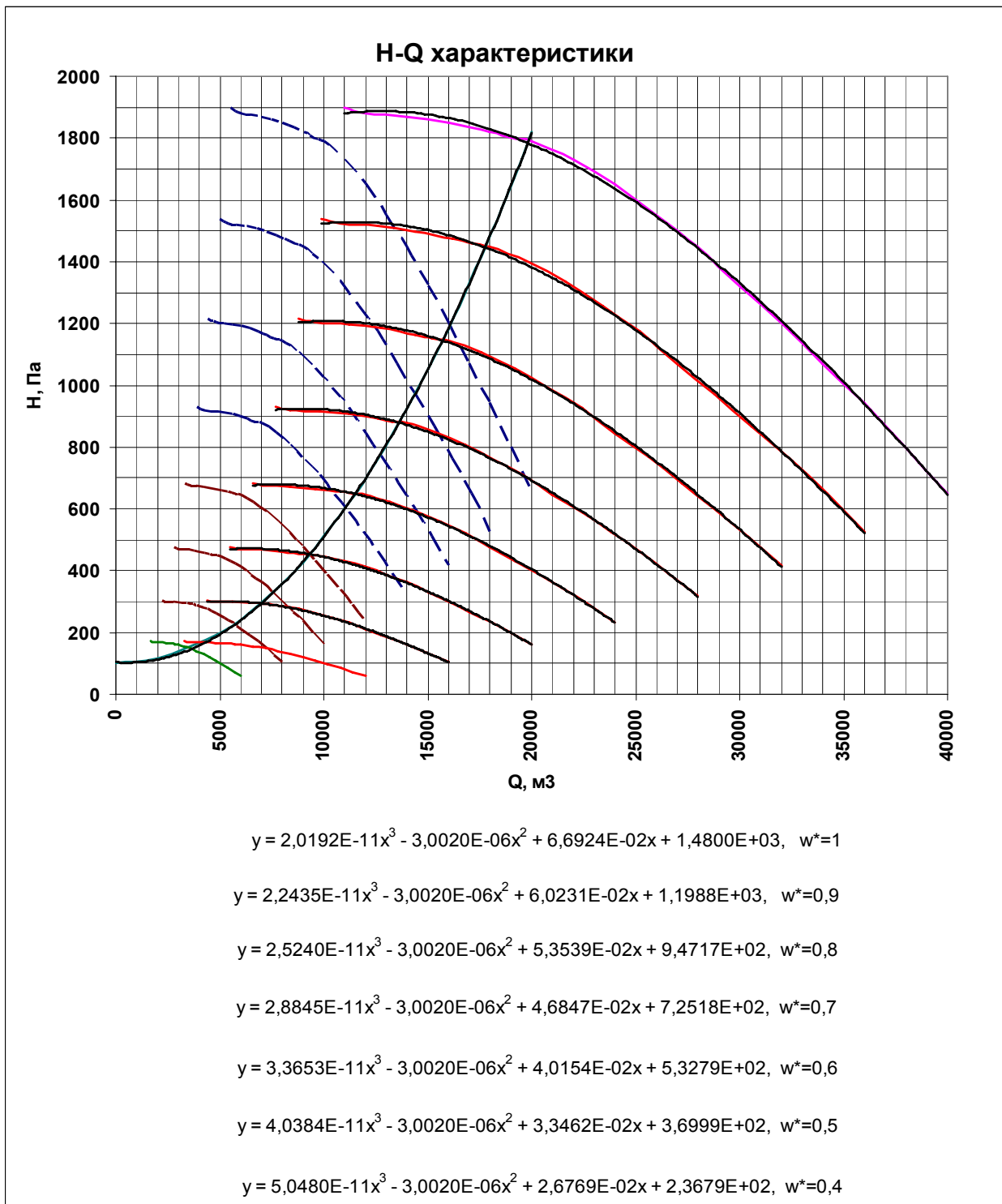
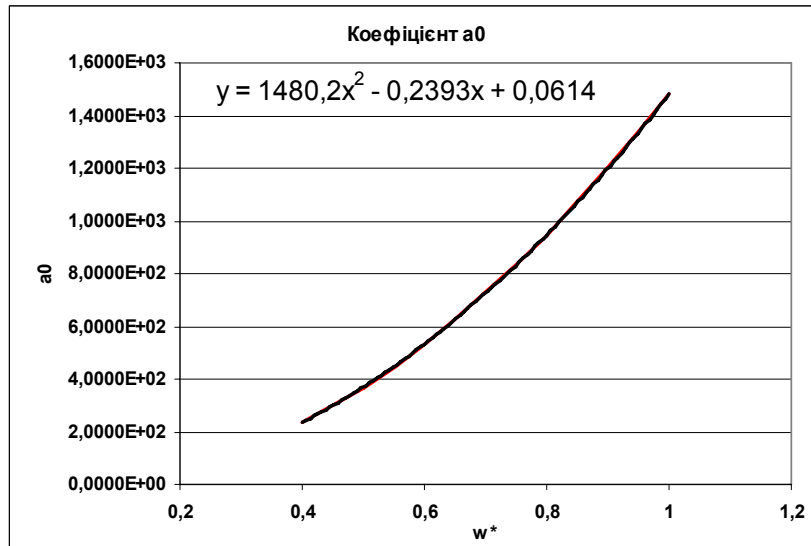
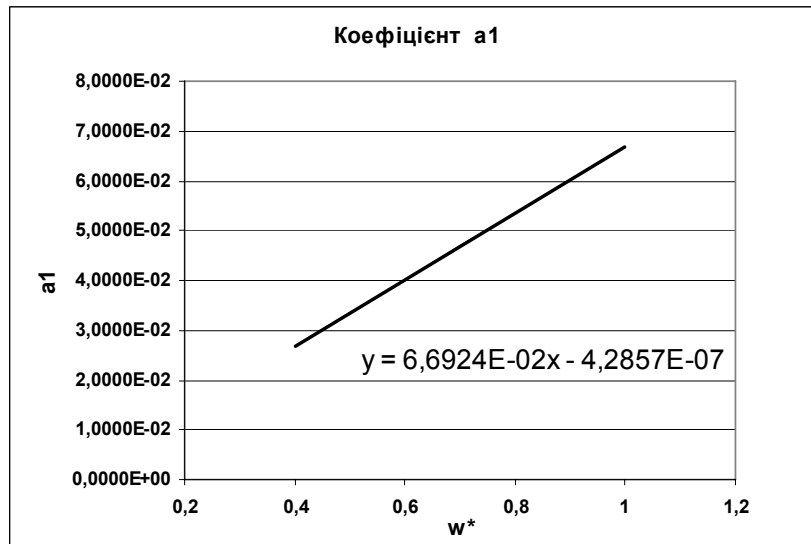
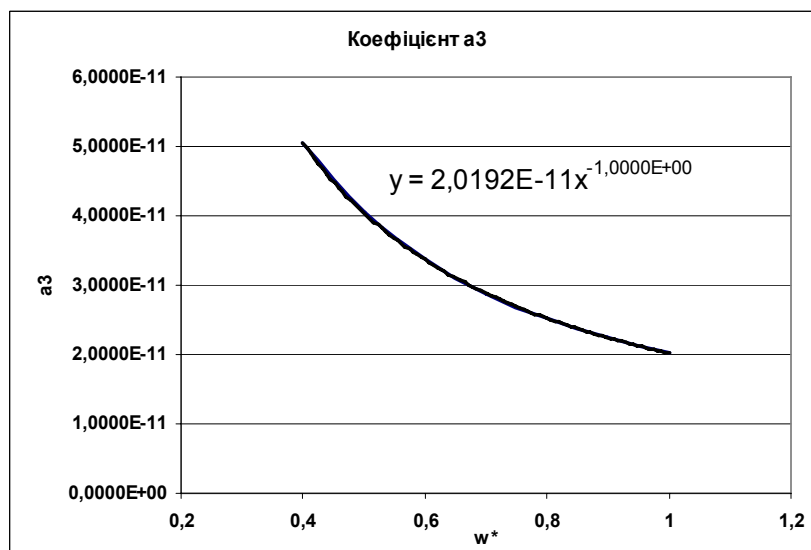


Рисунок 3.6 – Лінії тренда та рівняння для сумарних характеристик двох вентиляторів

Рисунок 3.7 – Коефіцієнт a_0 Рисунок 3.8 – Коефіцієнт a_1 Рисунок 3.9 – Коефіцієнт a_3

Проаналізувавши отримані результати, знайдемо наступні залежності:

$$a_0 = 1480,2 (\omega^*)^2 - 0,2393 (\omega^*) + 0,0614$$

$$a_1 = 6,6924 \times 10^{-2} (\omega^*) - 4,2857 \times 10^{-7}$$

$$a_3 = 2,0192 \times 10^{-11} \frac{1}{\omega^*}$$

Якщо підставити отримані рівняння в загальний вираз для $H-Q$ характеристики, отримаємо вираз, що описує вентилятор при будь якій відносній швидкості обертання, окрім нульової (виникає ділення на нуль у виразі для a_3).

Вираз для характеристики мережі, отриманий за даними табл. 1.4 має вигляд:

$$H = RQ^x + H_0 = 2,15 \times 10^{-8} Q^{2,07} + 100.$$

Для того щоб знайти спільну робочу точку і визначити яку витрату дають паралельно працюючі вентилятори, необхідно вирішити рівняння:

$$RQ^x + H_0 = a_3(\omega^*)Q^3 + a_2(\omega^*)Q^2 + a_1(\omega^*)Q + a_0(\omega^*).$$

Для моделювання скористаємося математичним пакетом MATLAB. Вирішувати наведення рівняння передбачається чисельним методом з деякою заданою точністю. Для цього задамося похибкою Δ і для відповідних значень ω^* та Q будемо шукати рішення нерівності:

$$(a_3(\omega^*)Q^3 + a_2(\omega^*)Q^2 + a_1(\omega^*)Q + a_0(\omega^*) - RQ^x - H_0) > \Delta.$$

Коли результат порівняння стане менше Δ , пошук припиняється і знайдене значення Q буде витратою в робочій точці при заданій швидкості ω^* .

Наведений алгоритм був реалізований у вигляді М-функції, текст якої наведено у додатку 1.

3.3 Моделювання роботи електропривода та аналіз результатів

Нижче на рис. 3.10 – рис.3 12 представлені результати моделювання паралельної роботи вентиляторів. На рис. 3.10 показані завдання на витрату Q_{zad} та вихід датчика витрати Q_{os} . Завдання в 4 одиниці відповідає витраті $8000 \text{ м}^3/\text{год}$. Як ми бачимо система ПД регулювання доволі точно підтримує і регулює витрату. Кожний вентилятор окремо видає вполовину меншки показники, тобто $4000 \text{ м}^3/\text{год}$.

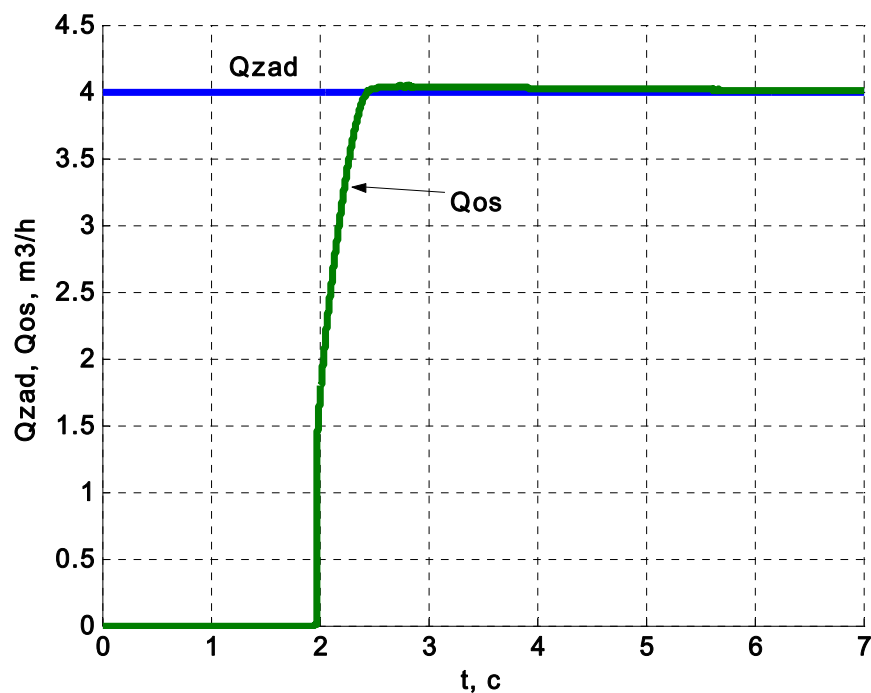


Рисунок 3.10 – Задана та дійсна подачі вентилятора

На рис. 3.11 представлені графіки швидкості та моменту двигуна. Розгін двигуна відбувається плавно. На початковому етапі відбувається повільне та плавне рушення. Момент двигуна за формою нагадує вентиляторний момент, що цілком відповідає властивостям системи, що розглядається. Великі коливання моменту при пуску відсутні. Саме це і забезпечує повільний і плавний рух вентилятора.

На рис.3. 12 показані криві струмів по вісях y та x відповідно, а також модуль струму статора I_s . Струм зростає плавно коливання струму відсутні. Як можна побачити, на початковому етапі складова струму I/x має не нульове

значення. Це реалізовано за рахунок побудови вольт-частотної характеристики на початковому етапі, коли при нульовій частоті напруга не нульова. Такий прийом дозволяє підвищити початковий пусковий момент.

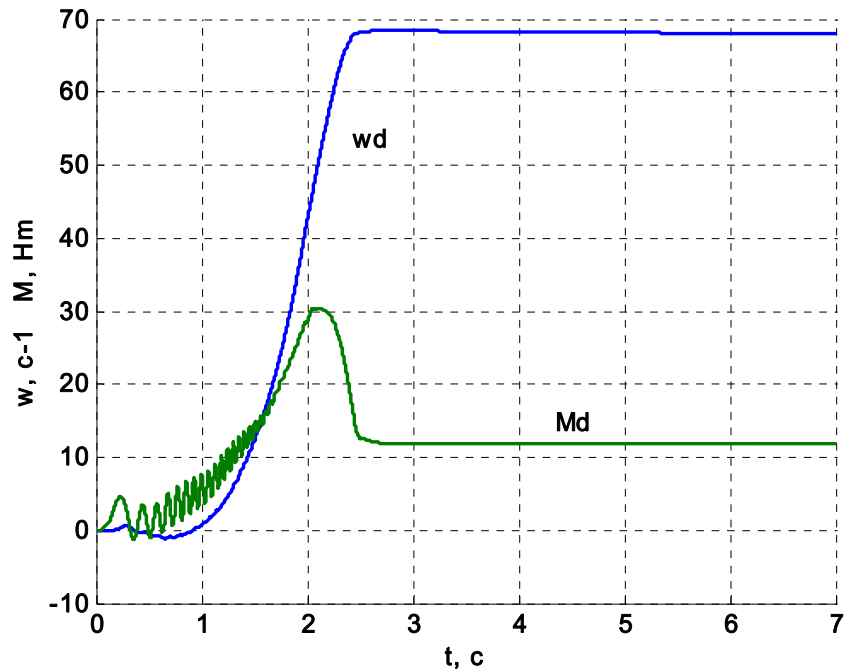


Рисунок 3.11 – Швидкість та момент двигуна

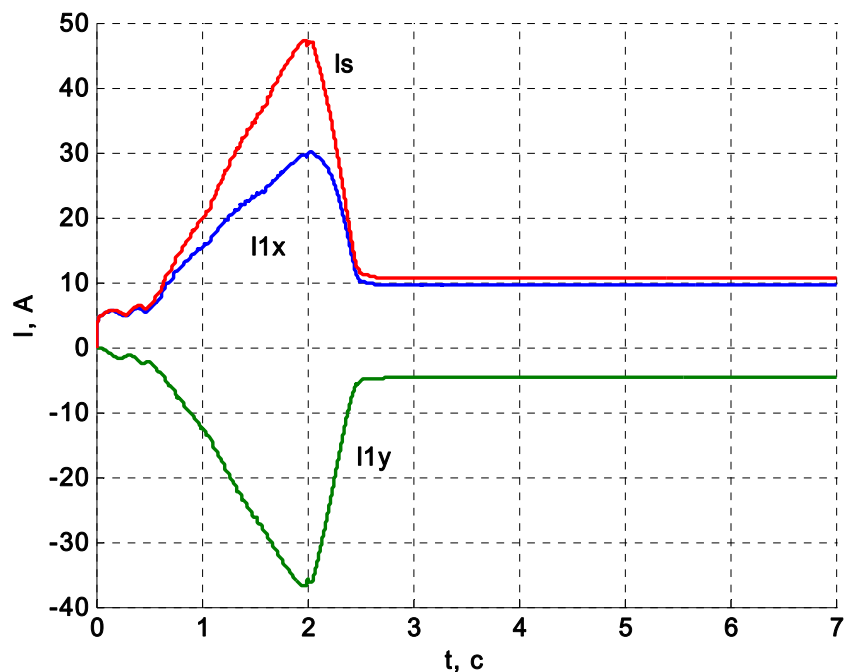


Рисунок 3.12 – Струми двигуна по складовим x та y, модуль струму статора

В цілому отримана система задовольняє всім вимогам, що до неї висувалися: регулювання витрати, плавний пуск та гальмування.

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТОВУВАННЯ

Вступ

Даним розділом дипломного проекту приводиться визначення економічної ефективності від впровадження двох видів вентиляторних установок. Одна установка складається з одного більш потужного вентилятора типу ВРАН9-9 з встановленою потужністю двигуна 15 кВт і прийнята як базова. Інша складається з двох вентиляторів ВРАН9-6,3 меншої потужності (2×7,5 кВт). Обидві установки мають однакові показники продуктивності і своєму складі використовують частотно-регульований електропривод.

Метою розрахунку є визначення економічної ефективності впровадження установки з двома вентиляторами в порівнянні з установкою з одним вентилятором.

Для визначення економічної ефективності необхідно розглянути наступні питання:

- розрахунок капітальних витрат на придбання та монтаж обладнання;
- розрахунок річних експлуатаційних витрат на утримання та обслуговування об'єкту проектування;
- визначення річної економії від впровадження об'єкта проектування;
- визначення та наліз показників економічної ефективності;
- зробити висновки щодо доцільності впровадження об'єкту проектування.

4.1 Розрахунок капітальних витрат

Капітальні вкладення – це грошові кошти, призначені для створення і придбання основних фондів і нематеріальних активів, що підлягають амортизації.

Капітальні витрати на здійснення проектного рішення визначаються:

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{об}} (\sum C_i) + K_{\text{тр}} + K_{\text{мн}} + K_{\text{пр}}$$

де $K_{\text{об}}$ – вартість придбаного устаткування, грн;

$K_{\text{тр}}$ – транспортно-заготівельні та складські витрати, грн;

$K_{\text{мн}}$ – витрати на монтаж і наладку устаткування, грн;

$K_{пр}$ – інші одноразові вкладення грошових коштів.

Перелік обладнання та його вартість для проектного та базового варіантів наведена в табл. 4.1 та табл. 4.2. Всі ціни наведено з урахуванням ПДВ. Ціни прийнято на базі цін фірм-дистриб'ютерів електрообладнання.

Таблиця 4.1

Проектний варіант (Варіант 1) – Два вентилятори

№ з/п	Найменування технічних засобів	Кількість	Ціна за одиницю	Сума, грн
1	Вентилятор ВРАН9-6,3	2	11740	23480,0
2	Перетворювач частоти ATV320U75N4	2	14024	28048,0
3	Шафа 600*600*300	1	4046,0	4046,0
4	Вимикач автоматичний іК60N? 20А, крива В	2	318	636
5	Кабель ПВС 4*2,5	20 м	28,62	572,4
6	Кабель ПВС 4*4	10 м	45,54	455,4
	Всього			57238,00

Таблиця 4.2

Базовий варіант (Варіант 2) – Один вентилятор

№ з/п	Найменування технічних засобів	Кількість	Ціна за одиницю	Сума, грн
1	Вентилятор ВРАН9-9	1	29511	29511
2	Перетворювач частоти ATV320D15N4	1	25033	25033
3	Шафа 600*600*300	1	4046,2	4046,2
4	Вимикач автоматичний іК60N 40А, крива В	1	541	541
5	Кабель ПВС 4*4	20 м	45,54	910,8
	Всього			60042,2

Транспортування придбаного устаткування здійснюється транспортом постачальника електрообладнання до складу замовника і складає 3000,00 грн у обох випадках.

Витрати на монтажні (Z_m) і налагоджувальні роботи (Z_n) можна визначити наступним чином:

$$Z_{m(n)} = \sum (C_i * a_i * t_i) * K_d * K_{cm} * K_{np} -$$

де $C_i = 2$ чол.– чисельність працівників 4-го розряду необхідних для виконання певного обсягу монтажних (налагоджувальних) робіт;

$a_i = 48,7$ грн– годинна тарифна ставка працівника 4-го розряду;

$t_i =$ час необхідний для виконання певного обсягу монтажних (налагоджувальних) робіт, за проектним варіантом – 40 годин, за базовим варіантом також 40 годин;

$K_d = 1,15$ – коефіцієнт що враховує розмір доплат;

$K_{cm} = 1,22$ – коефіцієнт що враховує єдиний соціальний внесок;

$K_{np} = 1,05$ – коефіцієнт що враховує інші витрати на здійснення монтажних (налагоджувальних) робіт.

Проектний варіант:

$$Z_{m(n)П} = 2 * 40 * 48,7 * 1,15 * 1,22 * 1,05 = 5739,40 \text{ грн}$$

Базовий варіант:

$$Z_{m(n)Б} = 2 * 40 * 48,7 * 1,15 * 1,22 * 1,05 = 5739,40 \text{ грн}$$

Зведемо капітальні витрати у табл. 4.3

Таблиця 4.3

Зведення капітальних витрат

№ п/п	Найменування витрат	Вартість, грн
Проектний варіант		
1	Вартість обладнання	57238,00
2	Вартість транспортування	3000,0
3	Вартість на монтажу і налагодження	5739,40
4	Загальна сума	65977,4
Базовий варіант		
5	Вартість обладнання	60042,0
6	Вартість транспортування	3000,0
7	Вартість монтажу і налагодження	5739,40
8	Загальна сума	68778,4

4.2 Розрахунок експлуатаційних витрат

До основних статей експлуатаційних витрат по електротехнічному обладнанню відносяться :

- амортизаційні (Ca);
- заробітна платня обслуговуючого персоналу (Cз);
- відчислення на соціальні заходи від заробітної платні (Cс);
- витрати на технічне обслуговування и текучий ремонт обладнання и мереж (Cт);
- вартість електроенергії, спожитою об'єктом проектування (Cэ).

Таким чином, річні експлуатаційні витрати складуть:

$$C = Ca + Cz + Cs + Ct + Cэ, \text{ грн.}$$

Так як в процесі упровадження проектного варіанта не планується міняти чисельність обслуговуючого персоналу, то розрахунки річного фонду заробітної платні и відрахування на соціальні заходи не проводяться.

$$C = Ca + Ct + Cэ, \text{ грн.}$$

Розрахунок експлуатаційних витрат проводиться по проектному и базовому варіантам паралельно.

4.2.1 Розрахунок амортизаційних відрахувань.

Річний фонд амортизаційних відчислень визначається в процентах от суми капітальних витрат по видам основних фондів и нематеріальних активів по розділам зведення капітальних витрат.

Обладнання, що встановлюється відноситься до 4 групи основних фондів – машини та обладнання з мінімальним строком експлуатації 5 років. Процент амортизаційних відчислень визначаємо прямолінійним методом – пропорційним розділенням суми витрат на весь строк служби.:

$$Ha = \frac{\Phi n - Л}{\Phi n Tn} \times 100\% = \frac{1}{Tn} \times 100\% = \frac{1}{5} \times 100\% = 20\%,$$

де Φn – первісна вартість об'єкта основних засобів,

Л- розрахункова ліквідаційна вартість основних засобів.

Оскільки обидва варіанти розглядаються для впровадження, ліквідаційна вартість основних засобів дорівнює 0,0 грн.

Результати розрахунку зведено до табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Амортизаційні відрахування

№	Назва	Капітальні витрати, грн	Норма амортизації, %	Сума амортизації, грн
1.	Проектний варіант	65977,4	20	13195,48
2.	Базовий	68778,4	20	13755,68

4.2.2 Розрахунок вартості спожитої електроенергії

В даному розділі розрахуємо спожиту електроенергію об'єктом проектування і для порівняння об'єктом за базовим варіантом.

Кількість спожитої за рік електроенергії в розраховуємо по формулі:

$$W_{\Gamma} = N_{y} \times \Phi_{\Gamma}$$

N_{y} – установлена потужність устаткування;

Φ_{Γ} – річний фонд робочого часу.

Річний фонд робочого часу визначимо по формулі:

$$\Phi_{\Gamma} = (D_{\text{к}} - D_{\text{пр}} - D_{\text{в}}) \times T_{\text{см}}, \text{ год.},$$

$$\Phi_{\Gamma} = (365 - 104 - 11) \times 8 = 2000 \text{ (год)}$$

де $D_{\text{к}}$ – кількість календарних днів в році;

$D_{\text{пр}}$ – кількість святкових днів в році, 11 днів у 2019 р;

$D_{\text{в}}$ – кількість вихідних днів, 104 дні;

$T_{\text{см}}$ – номінальний час роботи за рік, 8 год/змін.

Оскільки здійснюється регулювання продуктивності вентиляторів, то на протязі року вони працюють із різним рівнем споживаної потужності. Нижче у таблиці у відсотках від річного фонду робочого часу вказано середній розрахунковий рівень потужності вентиляторів.

Відсоток від річного фонду робочого часу	50%	30%	20%
Продуктивність вентиляторів	100% 20000 м3	75% 15000 м3	50% 10000 м3
Проектний варіант	11,09 кВт	6,86 кВт	6,05 кВт
Базовий варіант	13,92 кВт	11,64 кВт	8,98 кВт

Кількість споживаної зарік електроенергії в проектному варіанті

$$W_{\text{гп}} = 11,09 \times 0,5 \times 2000 + 6,86 \times 0,3 \times 2000 + 6,05 \times 0,2 \times 2000 = 17626,0 \text{ (кВт}\cdot\text{г)}$$

Кількість спожитої за рік електроенергії в базовому варіанті;

$$W_{\text{гб}} = 13,92 \times 0,5 \times 2000 + 11,64 \times 0,3 \times 2000 + 8,98 \times 0,2 \times 2000 = 24496 \text{ (кВт}\cdot\text{г)}$$

Вартість електроенергії, спожитої об'єктом на протязі року, визначається за наступною формулою:

$$C_{\text{э}} = W_{\text{г}} \cdot C_{\text{э}},$$

де $C_{\text{э}}$ - тариф 1 кВт×год електроенергії для споживача I-го класу, за даними «Дніпрообленерго» станом на 01.12.2018 р становить 1,965 грн з ПДВ;

$W_{\text{г}}$ – кількість спожитої електроенергії, кВт×год.

Вартість електроенергії, що споживається об'єктом проектування на протязі року:

$$C_{\text{эп}} = 17626,0 \cdot 1,965 = 34635,09 \text{ (грн.)}$$

Вартість електроенергії, що спожита на протязі року в базовому варіанті:

$$C_{\text{эб}} = 24496 \times 1,6375 = 48134,64 \text{ (грн.)}$$

Результати розрахунку зведено до табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Витрати за спожиту електроенергію

№	Назва	Потужність електрообладнання, кВт	Спожита електроенергія, кВт·ч	Вартість спожитої електроенергії, грн
1.	Проектний варіант	2×7,5	17626,0	34635,09
2.	Базовий	15	24496	48134,64

4.2.3 Витрати на технічне обслуговування и текучий ремонт

Річні витрати на технічне ремонт обслуговування и текучий ремонт електротехнічного обладнання включають витрати на матеріали, запасні частини, заробітну плату ремонтним робочим и т.д. Обчислюються по формулі:

$$C_T = \sum_{i=1}^n \left(h_i \cdot t_{1i} \cdot m_i \cdot R_{\Sigma i} + \frac{S_i \cdot \Pi_i}{T_i} \cdot T_{\Phi} \right),$$

Де n – число приборів, які належать ремонту;

- $h = 6,5$ грн/год, – годинна тарифна ставка робочих, які роблять ремонт;
- t_1 – трудомісткість одного ремонту при категорії складності ремонту в одну ремонтну одиницю в залежності від виду ремонту, г/ед;
- m – число ремонтів в рік;
- $R_{\Sigma} = 2,5$ – сумарна категорія складності ремонту в залежності від виду електрообладнання;
- S – вартість однотипних змінних елементів, грн;
- Π – кількість однотипних змінних елементів;
- T – середній строк служби деталей даного типа, ч;
- $T_{\Phi} = 2000$ год, – число годин роботи електрообладнання в році.

Результати розрахунку зведено до табл. 4.6.

Таблиця 4.6

Витрати на технічний ремонт

	h	t1	m	R _Σ	S1	Π1	T1	S2	Π2	T2	T _ф	C _{T1}	C _{T2}	C _T
Проект-ний	6,5	1,2	1	2,5	900	2	2000	3	50	2000	2000	1919,5	169,5	1989
Базовий	6,5	1,2	1	2,5	1087	2	2000	2	93	2000	2000	2193,5	205,5	2399

Таким чином річні експлуатаційні витрати для
проектного варіанта:

$$C_{\text{пр}} = 13195,48 + 34635,09 + 1989 = 49819,57 \text{ грн};$$

базового варіанта:

$$C_{\text{б}} = 13755,68 + 48134,64 + 2399 = 64289,32 \text{ грн.}$$

Повна річна економія від упровадження об'єкту проектування
визначається за формулою:

$$E_{\text{кр}} = C_{\text{б}} - C_{\text{п}}$$

$$E_{\text{кр}} = 64289,32 - 49819,573 = 14469,75 \text{ (грн)}$$

4.3 Оцінка економічної ефективності проекту

1. Коефіцієнт ефективності (прибутковості) капітальних витрат E_p
показує, скільки гривень додаткового прибутку приносить одна гривна
капітальних витрат:

$$E_p = E_{\text{кр}} / K_{\text{пр}}$$

$$E_p = 14469,75 / 65977,4 = 0,219$$

2. Термін окупності капітальних витрат $T_{\text{ок}}$ показує, за скільки років
вони окупляться за рахунок загального прибутку від упровадження проектного
варіанту:

$$T_{\text{ок}} = K_{\text{пр}} / E_{\text{кр}}$$

$$T_{\text{ок}} = 65977,4 / 14469,75 = 4,56 \text{ (років)}$$

В проектному варіанті термін окупності не більше 4,56 років, що
цілком задовольняє встановленим вимогам. Зведемо результати до таблиці 4.7.

Оцінка техніко-економічних показників

№	Найменування показників	Од. вимірюв.	Проектний варіант	Базовий варіант	Зміна	
1	Капітальні витрати	грн.	65977,4	68778,4	2801,00	
2	Експлуатаційні витрати:	грн.	49819,57	64289,32		
	- амортизаційні відрахування	грн.	13195,48	13755,68		560,2
	- технічне обслуговування і поточний ремонт	грн.	1989	2399		410
	- вартість спожитої електроенергії	грн.	34635,09	48134,64		13499,55
3	Річна економія	грн.	14469,75			
4	Розрахунковий коеф. ефективності	част. од.	0,219			
5	Розрахунковий термін окупності капітальних вкладень	років	4,56			
6	Економія електроенергії	кВт-ч	17626,0	24496	- 6870	

Висновки

За результатами розрахунків впровадження проектного варіанту є більш доцільним ніж базового, тому що не зважаючи на незначно більші капітальні вкладення, рівень експлуатаційних витрат значно менший. У результаті термін окупності проекту складає 4,56 роки, що на 20% менше припустимого терміну для даного класу обладнання.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуто характеристики вентиляторних установок при регулюванні частоти обертання за допомогою перетворювачів частоти.

2. Проаналізовано особливості паралельної роботи вентиляторів при регулюванні їх швидкості обертання.

3. Розраховано та синтезовано систему вольт частотного керування електроприводом вентиляторів. Розроблено математичну модель вентиляторної установки, складеної з двох паралельно працюючих вентиляторів. Використано ПД-регулятор витрати.

4. Методами математичного моделювання проведено дослідження впливу зміни параметрів електропривода на якість роботи запропонованої системи керування електроприводом, отримані залежності.

5. Для ефективного регулювання витрати та забезпечення надійної роботи двох паралельно працюючих вентиляторів необхідно одночасно регулювати їх швидкість обертання.

6. В розділі «Техніко-економічне обґрунтування» проведено розрахунок капітальних та експлуатаційних витрат, визначений термін окупності при впровадженні запропонованої системи електропривода.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Черкасский В.М., Романова Т.М., Кауль Р.А. Насосы, вентиляторы, компрессоры: Учебное пособие для энергетических вузов и факультетов. Изд. 2-е, переработ. и доп. М. «Энергия», 1968. – 304 с.
2. Соломахова Т.С., Чебышева К.В. Центробежные вентиляторы. Аэродинамические схемы и характеристики: Справочник. – М.: Машиностроение, 1980. – 176 с., ил.
3. Бак О. Проектирование и расчет вентиляторов. / Пер. с немецкого. Под ред. А.Р. Бушеля - ГНТИ Литературы по горному делу, 1961. - 364 с., ил.
4. ГОСТ 10616-90 Вентиляторы радиальные и осевые. Размеры и параметры.
5. www.veza.com.ua Вентиляторы радиальные ВЕЗА. Каталог . – ООО ВЕЗА-Украина, 2011г. -152 с.
6. Казачковський М.М. Комплектні електроприводи: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ: НГА України, 2003. – 225 с.
7. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
8. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. Изд. 6-е, исправленное. М.: «Энергия», 1977. – 432 с.
9. Справочник по электрическим машинам. В 2-х т./Под. ред. И.П. Копылова и В.К. Клокова - М: Энергоатомиздат, 1988. т.1. -655 с.; т.2. -496 с.
10. Справочник по автоматизированному электроприводе / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. -616 с.
11. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
12. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. – М.-Л., Госэнергоиздат, 1963. – 772 с.
13. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
14. Колб Ант. А., Колб А.А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник – Д., Національний гірничий університет, 2006. – 511 с.

15. www.schneider-electric.ua ALTIVAR 61 Преобразователи частоты.

Инструкция по программированию, 2011 г.

16. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.

17. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Под ред. Л.Г. Мамиканянца – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984 – 240 с.

18. Энергосберегающий асинхронный электропривод. Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Браславский И.Я, Ишматов З.Ш., Поляков В.Н; Под редакцией И. Я. Браславского. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.

М-функція пошуку витрати у робочій точці мережі та двох вентиляторів,
що працюють паралельно

```
function Qsum = ventilator (w_otn);
%H=A3*x^3+A2*x^2+A1x+A0 - дл_ любой относительной скорости H-Q характе-ка,
%X-расход
Ctr=2.15e-6; H0=100;
A2=-3.002e-06;
A1=(6.6924E-02)*w_otn(1) - (4.2857E-07);
A0=1480.2*w_otn(1)^2 - 0.2393*w_otn(1) + 0.0614;
H1=0; H2=100;
if (w_otn(1)>=0.6) & (w_otn(1)<0.8)
    i=6000;
elseif w_otn(1)>=0.8
    i=10000;
else
    i=1;
end
if w_otn(1) == 0
    Qsum=0;
else
    A3=(2.0192e-11)/w_otn(1);
    delta=H1-H2;
    while abs(delta)>5
        H1=A3*i^3+A2*i^2+A1*i+A0;
        H2=Ctr*i ^2.07+H0;
        if H1<=H0;
            Qsum=0;
            delta=0;
            % disp('H1-H2='),H1-H2,
        else
            Qsum=i;
            delta=H1-H2;
            i=i+5;
        end
    end
end
end
```

М-файл для побудови механічних характеристик при вольт частотному керуванні за законом $U/F^2=\text{const}$

```

%Этот файл рассчитывает параметры схемы замещения АД по относительным
%значени_м. Параметры используютс_ в модели, ориентированной по вектору напряжени_
%статора. Модель для вольт-частотного управлени_.
%=====
clc
%Тип АД 4А132S4У3 - IP44 4А Кравчика
%Число полюсов и пар полюсов
    pol=4; par_p=pol/2;
%Номинальная частота сети Гц, рад/с и синхронные скорости
    fc=50;          wc=2*pi*fc,
    n0=60*fc/par_p,  w0=pi*n0/30, %w0=2*pi*fc/par_p

%Мощность на выходе , Вт
    Pn=7500, kpd=0.875, cosy=0.86, Ufn=220,

disp('=====')
%Параметры Г-образной схемы замещения в относительных единицах
    X1go=0.085, R1go=0.048, X2o=0.13, R2o=0.033, Xmo=3,
%Основные данные механической характеристики
    sn=0.029, %sk=0.11, Mpo=1.4, Mmino=1.2, Mko=2.5, Ipo=7.5, J=0.25;
    % Js=1.5*J;
    Nn=60*fc/par_p*(1-sn);
%Номинальный фазный ток и базовое сопротивление
disp('=====')
%    Ifn=Pn100/(3*Ufn*kpd100*cosy100),
    Ifn=Pn/(3*Ufn*kpd*cosy),
    Zb=Ufn/Ifn,
%Пересчет сопротивлений X1 и R1 на Т-образную схему
    X1o=2*X1go*Xmo/(Xmo+sqrt(Xmo^2+4*X1go*Xmo)),
    R1o=R1go*X1o/X1go,
%Пересчет сопротивлений в абсолютные единицы
    X1=X1o*Zb, R1=R1o*Zb, X2=X2o*Zb, R2=R2o*Zb, Xm=Xmo*Zb,
%    R2=R2o*Zb*1.398 %учет превышения сопротивления ротора при пуске
%Индуктивности обмоток
    L1=(X1+Xm)/wc, L2=(X2+Xm)/wc, Lm=Xm/wc, Lk=(X1+X2)/wc,

    s=[ ];
    s=linspace(0.001,1.2,200);
%===== ventilator =====
Mc_vent=[2.5 5 8 10.59 13.48 17.56 22.18 26.62 33.18 40.46];
W_vent=[ 0 0.18 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1]*Nn*pi/30;
    kU=sqrt(2)*Ufn/(fc^2),
    kU1=Ufn/(fc^2),
disp('=====')
%Номинальный момент, критический момент
    Mn=Pn/(w0*(1-sn)),

```

```

%Расчетное критическое скольжение
skp=R2/sqrt(R1^2+(X1+X2)^2),
%Расчетный критический момент
Mkp=0.5*(3*Ufn^2)/(w0*(R1+sqrt(R1^2+(X1+X2)^2)));
%=====
%=====
%Построение механических характеристик при частотном регулировании по Вишеневскому
%Закон регулирования U/f2 для насоса
%Диапазон абсолютных и относительных частот
disp('=====ПРИМЕМ=====');
f=[5 10 20 30 40 50],% 60 70],
fo=f/fc,
Cf1=(1./(Xm*fo).^2);
Cf2=sqrt(((X1+Xm).*Xm.*fo.^2).^2+(R1*Xm.*fo).^2);
Cf=Cf1.*Cf2,%[1 1 1 1 1 1],% 1 1]%
Kf=Ufn/fc^2;

%Номинальная фазная ЭДС
%sn=0.066 %snf(find(f==50));
Cfn=Cf(find(f==50));
Efn=Ufn*sqrt(((R2/sn)^2+X2^2)/((R1+Cfn*R2/sn)^2+(X1+Cfn*X2)^2));
%Номинальный ток намагничивания
Ion=Efn/Xm;
a=14.3*Ion^2*fo*Xm^2/(Mn*n0);
snf=R2./(a+sqrt(a.^2-(X2*fo).^2));
%Напряжение статора, необходимое для поддержания потока статора и постоянного Мк
B1=(Xm*fo).^2.*((R1+Cf.*R2./snf).^2+(X1+Cf.*X2).^2.*fo.^2);
B2=(R2./snf).^2+(X2.*fo).^2;
Uf=Ion*sqrt(B1./B2),
for kk=1:length(Uf)
    if Uf(kk)> Ufn
        Uf(kk)=Ufn;
    end
end
Uf
%=====
% При U/f=const и IR-comp
M=[ ]; w1=[ ]; A1=[ ]; A2=[ ];
%figure ('Name', '2');
for k=1:length(fo)
    for j=1:length(s)
        if fo(k)>=1
            Us(k)=Ufn;
        else Us(k)=Ufn*fo(k)^2;
        end
    % U/F
    A1(k,j)=(3*Us(k)^2*R2/s(j));
    A2(k,j)=w0*fo(k)*((R1+Cf(k)*R2/s(j))^2+(X1+Cf(k)*X2)^2*fo(k)^2);
    M(k,j)=A1(k,j)/A2(k,j);
    % U/F+IR
    D1(k,j)=(3*Uf(k)^2*R2/s(j));
    D2(k,j)=w0*fo(k)*((R1+Cf(k)*R2/s(j))^2+(X1+Cf(k)*X2)^2*fo(k)^2);

```

```

    Mir(k,j)=D1(k,j)/D2(k,j);
%=====
    w1(k,j)=w0*(1-s(j))*fo(k);
    end
    line(M(k,:),w1(k,:),'Color','r','LineStyle','-','LineWidth',2),grid on,
    %line(Mir(k,:),w1(k,:),'Color','b','LineStyle','-','LineWidth',2),grid on,
end
%===== Nasos =====
    line(Mc_vent,W_vent,'Color','b','LineStyle','-','LineWidth',2),grid on,
%=====
%    line(M1,w,'Color','m'),
    figure('Name','3');
    line(f,Uf,'Color','r','LineStyle','-','LineWidth',2),
    line(f,Us,'Color','b','LineStyle','-','LineWidth',2),grid on,
%=====

```